Research Article
ISSN 2304-6295
Received: October 23, 2022 *Accepted: December 02, 2022* *Published: December 06, 2022*

Energy efficiency of radiant heating systems based on water emitting profiles

Bodrov, Mikhail Valerevich[1]
Smykov, Aleksandr Anatolevich[1*]

[1] Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNGASU), Nizhny Novgorod, Russian Federation
Correspondence: *email aleksandrsmykov@gmail.com; contact phone +79050103377

Keywords:

Thermal physics; Radiant heating; Water heating; Infrared radiation; Emitter; Energy efficiency

Abstract:

The use of energy efficient heating systems is justified by the current economic conditions, one of the types of such systems are radiant heating systems. The most energy-efficient solution is the use of gas infrared emitters, in this case, there is no intermediate heating medium, and the heat of combustion of the gas enters the premises, but this solution has a few restrictions on the availability of natural gas, comfort, and fire hazard. **The object of research** is water infrared emitters, which can be emitting panels or profiles using an intermediate coolant, but do not have many of the limitations inherent in gas systems. A common problem for all types of radiant heating is the lack of a scientifically grounded and generally accepted engineering methodology for its design, and most of the regulatory documents simply do not consider the peculiarities of the operation of radiant heating systems and, thus, do not allow a few its advantages to be realized. This research was carried out based on Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNGASU) Radiant Heating Laboratory, unique in Russia. **Method.** For a comprehensive study of the model of a radiant heating system based on water infrared emitters, a number of laboratory and field experiments were conducted: study of the thermal characteristics of a water infrared emitter; study of the radiant characteristics of a water infrared emitter; study of the thermal regime in rooms with heating systems based on water infrared emitters; study of the temperature regime in rooms equipped with radiant heating systems based on water infrared emitters; investigation of the thermal regime of external enclosing structures in rooms with heating systems based on water infrared radiation. **Results.** Laboratory tests of water radiant heating systems have shown their high efficiency, and the data obtained during the research formed the basis of "Recommendations for the design of radiant heating systems based on water infrared emitters", which are essentially an engineering methodology for calculating the thermal regime of premises for various purposes.

1 Введение / Introduction

Вследствие того, что цены на энергоносители постоянно увеличиваются, а технологическая потребность в энергии только возрастает, проблема энергосбережения является одной из самых острых в строительной отрасли не только на территории России, но и во всем мире [1]. Большое количество энергоресурсов расходуется на отопление производственных помещений большого объёма [2,3]. Применение систем инфракрасного отопления является одним из самых перспективных способов повышения энергоэффективности таких помещений [4, 5]. Среди прочих способов оно заслуживает особое внимание, т.к. по сравнению с конвективными системами отопления требует меньших затрат теплоты без снижения уровня теплового комфорта [6].

Принципиальным отличием систем отопления на базе инфракрасных излучателей является то, что теплота подаётся в рабочую зону направленным потоком теплового излучения [7, 8]. При этом воздух является прозрачными для электромагнитного излучения в инфракрасном спектре,

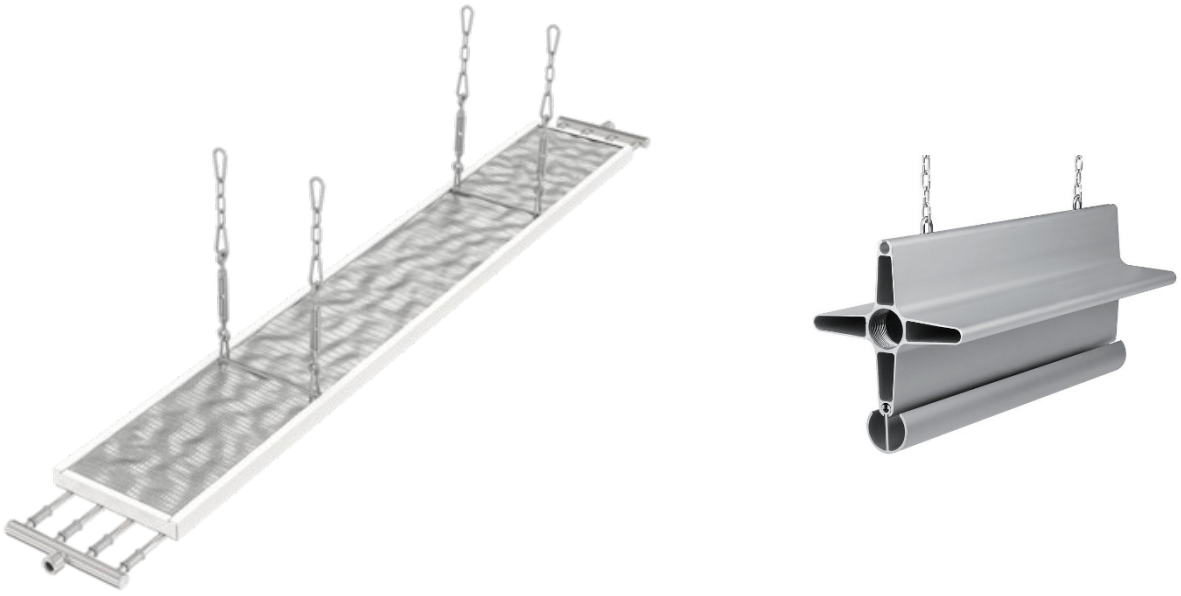
лишь рассеивая его, и энергия от инфракрасных излучателей аккумулируется на приповерхностных слоях облученных поверхностей, и затем формирует конвективные потоки, нагревающие воздух рабочей зоны. Данные особенности указывают на принципиальное отличие от конвективных систем отопления и ведут к повышению энергоэффективности [9].

На рынке представлены различные приборы инфракрасного отопления, классифицируемые по температуре поверхности излучателя. Так различают:

- светлые (т = 400-1200 °С);
- тёмные (т = 200-400 °С);
- низкотемпературные (т = 30-200 °С).

Наиболее энергоэффективным видом инфракрасного отопления является отопление на базе газовых инфракрасных излучателей «светлого» и «тёмного» типа [10, 11]. В таких системах нет промежуточного теплоносителя (воды, пара), тепловая энергия поступает в помещение напрямую от сжигания первичного энергоносителя – природного газа [12, 13]. Но использование подобных систем связано с некоторыми сложностями, например, применение любых видов газовых инфракрасных излучателей в помещениях с повышенными противопожарными требованиями запрещено [14]. Кроме того, использование «светлых» газовых инфракрасных излучателей связано с выбросом уходящих газов непосредственно в объём обслуживаемого помещения, что приводит к удорожанию системы принудительной вентиляции в помещении. Также, подключение газа во многих регионах затруднено и может быть финансово неоправданным.

Самым эффективным видом лучистого отопления, применение которого не является ограниченным, являются системы лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей [15, 16]. Отопительными приборами в данных системах служат излучающие панели (рисунок 1а) или излучающие профили (рисунок 1б), а теплоносителем – горячая вода с температурой от 40 °С до 150 °С. Тепловая энергия передаётся от теплоносителя к отопительному прибору, а он, в свою очередь, излучает электромагнитные волны в инфракрасном диапазоне, тем самым обеспечивая отопление обсуживаемого помещения.



а
a

б
b

Рис. 1 - Приборы инфракрасного отопления: а – водяная излучающая панель; б – водяной излучающий профиль
Fig. 1 - Infrared heating devices: a – water emitting panel; b – water emitting profile

Основными недостатками излучающих панелей, по сравнению с излучающими профилями являются:

- большее количество конструктивных элементов;
- более сложный гидравлических режим;
- высокая масса конструкции;

- меньшая надёжность ввиду сложности конструкции;
- меньшая удельная теплоотдача.

В то же время использование систем отопления на базе водяных излучающих профилей характеризуется рядом преимуществ [17, 18]:

- низкая тепловая инерция, что обеспечивает короткое время включения;
- простое и эффективное гидравлическое регулирование, за счёт меньшего количества теплоносителя;
- простота монтажа и обслуживания, за счёт кратного уменьшения длины транзитных трубопроводов;
- экономия пространства;
- долгий срок службы.

Из-за перечисленных недостатков излучающие профили получают всё большее распространение на рынке отопительных приборов Европы и мира [19], однако в России они пока не получили должного распространения. Отсутствие апробированной и научно-обоснованной методики проектирования систем отопления на базе излучающих профилей является одной из причин низкого распространения систем этого типа.

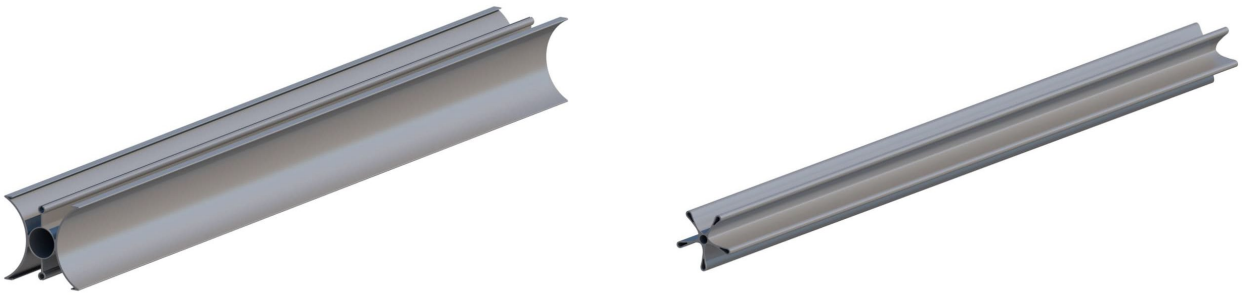
Рядом работ, проведённых в России, уже доказано, что применение систем отопления на базе водяных инфракрасных излучателей является эффективным и экономически-обоснованным в крупнообъёмных помещениях, таких как: производственные помещения; шоурумы; здания транспортной инфраструктуры; спортивные комплексы и т.д. Вследствие этого, Нижегородским государственным архитектурно-строительным университетом и ООО «Флайг+Хоммель» для проведения комплекса исследований модели лучистой системы отопления на базе водяных излучающих профилей и внедрения водяных излучающих профилей на рынок России был создан учебно-научно-исследовательский центр «Системы отопления с использованием низкотемпературных инфракрасных излучателей». В основу Центра легла Лаборатория лучистого отопления (рисунок 2), оборудованная необходимой приборной базой.

Рис. 2 - Общий вид Лаборатории лучистого отопления
Fig. 2 - General view of the Radiant Heating Laboratory

Для создания полноценной картины работы системы отопления на базе водяных излучающих профилей требуется проведение следующих экспериментальных исследований [20]:

- определение удельной теплоотдачи излучающего профиля;
- исследование теплового режима отапливаемого помещения;
- исследование теплового и температурного режимов ограждающих конструкций обслуживаемого помещения.

Объектом исследований стали излучающие профили моделей Helios 750 (разработаны в Германии) и Flower 125 (разработаны в России), модели отличаются типоразмером и формой (таблица 1). Обе модели производятся на заводе ООО «Флайг+Хоммель» (рисунок 3).

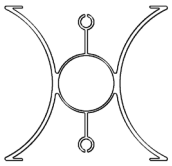


а
a

б
b

Рис. 3 - Излучающие профили: а – марки Helios 750; б – марки Flower 125
Fig. 3 - Radiating profiles: a – Helios 750 brands; b – Flower 125 brands

Таблица 1. Характеристики излучателей – объектов исследования
Table 1. Characteristics of emitters – objects of research

Характеристики	Ед. изм.	Марка излучателя	
		Helios 750	Flower 125
Сечение	-		
Материал	-	AlMgSi0,5	AlMgSi0,5
Габариты	мм	170x170	125x125
Удельная площадь	$м^2$/п.м	1,3	0,603
Удельная ёмкость	л/п.м	2,6	0,28
Удельная масса профиля	кг/п.м	7,1	3,6
Удельная масса профиля с водой	кг/п.м	9,2	3,98
Подключение	дюйм	2	1/2
Максимальное рабочее давление	бар	10	10
Максимальная рабочая температура теплоносителя	°C	150	150

Новизна результатов, полученных в ходе исследования:

- на основании полученных зависимостей распределения плотности потока излучения водяными инфракрасными излучателями разработана методика расчёта теплового режима ограждающих конструкций производственных помещений;
- впервые разработана и апробирована в натурных условиях методика исследований, позволяющая определить достоверные теплотехнические характеристики водяных инфракрасных излучателей, которые используются для описания теплового режима производственных помещений;
- теоретически-экспериментальным методом получены закономерности формирования температурного режима производственных помещений, оборудованных системами лучистого

отопления, которые позволяют снизить градиент температуры по высоте помещения, по сравнению с конвективным отоплением.

2 Материалы и методы / Materials and Methods

Характеристики исследуемого излучателя марки Helios 750: ширина – 170 мм; высота – 170 мм; длина – 1000 мм; материал профиля – анодированный сплав алюминия (AlMgSi0,5); максимальное рабочее давление – 10 бар; максимальная температура подаваемого теплоносителя ограничена только лишь характеристиками источника теплоты, т.к. сплав не подвержен коррозии и высокотемпературной эмиссии электронов.

Характеристики исследуемого излучателя марки Flower 125: ширина – 125 мм; высота – 125 мм; длина – 1000 мм; материал профиля – анодированный сплав алюминия (AlMgSi0,5); максимальное рабочее давление – 10 бар; максимальная температура подаваемого теплоносителя ограничена только лишь характеристиками источника теплоты, т.к. сплав не подвержен коррозии и высокотемпературной эмиссии электронов.

Данные образцы были разработаны и предоставлены промышленными партнёрами, они обладают разными типоразмерами. В испытательной установке используются 6 отопительных приборов длиной по 1 м, что позволяет, используя попеременной их выключение, смоделировать фрагмент системы водяного лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей, применить известные в этой области методики испытаний, получить экспериментальные данные, которые масштабируемы для создания и усовершенствования методики проектирования систем лучистого отопления [21].

2.1 Исследование удельной теплоотдачи излучателей / Research of the specific heat transfer of emitters

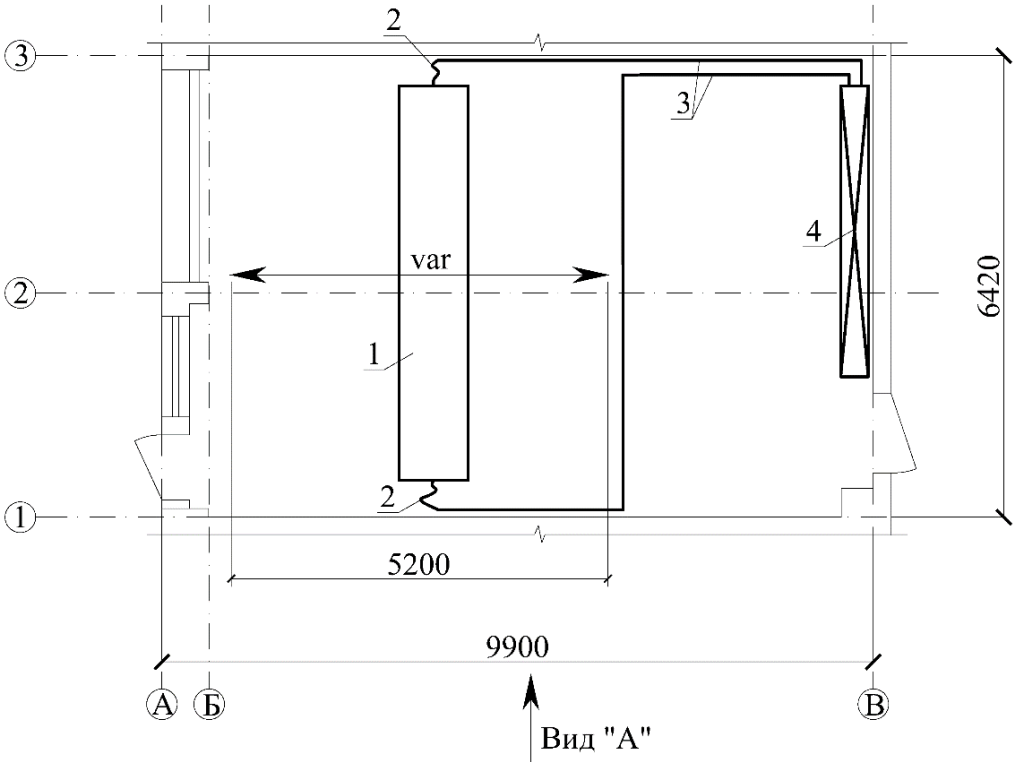
Цель исследования – определение удельной теплоотдачи 1 п.м. излучателя $q_{изл}$ и сравнение данной характеристики с другими марками водяных инфракрасных излучателей [22]. Измерения производились с помощью электромагнитного расходомера-счётчика марки ЭРСВ-570Ф и вычислителя количества теплоты ТРСВ-026М производства ЗАО «Взлёт», схема испытательной установки приведена на рисунке 4. Измеряемые величины: T_1 – температура теплоносителя в подающем трубопроводе экспериментальной установки, °С; T_2 – температура теплоносителя в обратном трубопроводе экспериментальной установки, °С; G_1 – массовый расход теплоносителя в подающем трубопроводе экспериментальной установки, кг/ч; G_2 – массовый расход теплоносителя в обратном трубопроводе экспериментальной установки, кг/ч; N – количество включённых излучателей, шт.; $Q_{тр}$ – транзитные тепловые потери, Вт, измеренные экспериментально.

Уравнение удельной теплоотдачи 1 п.м. излучателя для нашей испытательной установки:

$$q_{изл} = \left(\frac{G_1 \cdot c_{T_1} \cdot T_1}{3,6} - \frac{G_2 \cdot c_{T_2} \cdot T_2}{3,6} - Q_{тр} \right) / N, \text{Вт/п.м}, \quad (1)$$

где c_{T1} и c_{T2} – теплоёмкость воды в подающем и обратном трубопроводе, соответственно, кДж/кг·°С.

а
a



б
b

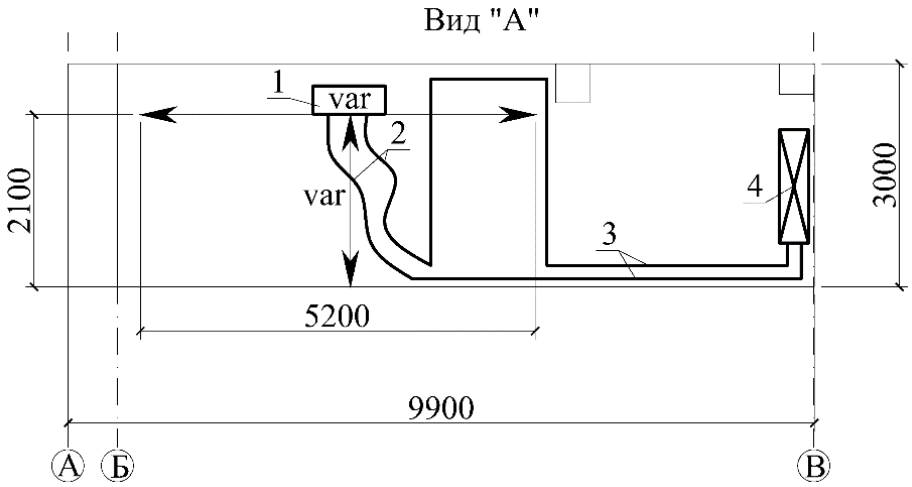


Рис. 4 - Экспериментальная установка Лаборатории лучистого отопления ННГАСУ; а – план лаборатории, б – вид «А»; 1 – передвижная установка с излучателями; 2 – гибкие подводки; 3 – трубопроводы; 4 – индивидуальный тепловой пункт

Fig. 4 - Experimental installation of the NNGASU Radiant Heating Laboratory; a – laboratory plan, b – type "A"; 1 – mobile installation with radiators; 2 – flexible pipes; 3 – pipelines; 4 – individual heat point

2.2 Исследование температурного режима помещения / Research of the room temperature regime

Цель исследования – определение различий при формировании температурного режима в помещении с лучистым и конвективным отоплением [23]. Объектом исследования теплового режима стало помещение Лаборатории лучистого отопления УНИЦ «СОНИИ» ННГАСУ. В помещении высотой 3,0 м, помимо установки с инфракрасными излучателями и двух радиаторов, подключённых к резервному источнику теплоснабжения, размещены 16 датчиков ТС-1388/12 подключенных к многоканальному термометру ТМ 5104Д/В/t1050/ГП производства ООО НПП «Элемер». Схема расположения датчиков в лаборатории приведена на рисунке 5.

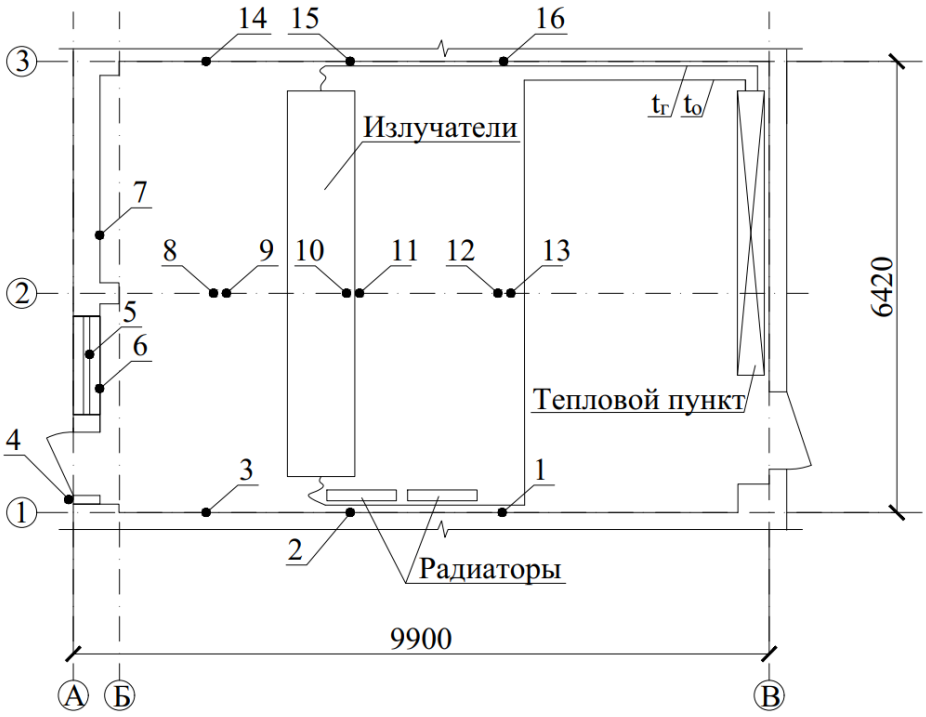


Рис. 5 - Схема расположения температурных датчиков в лаборатории: 1 – на стене, 2 – на стене, 3 на стене, 4 – на улице, 5 – на окне, 6 – под окном на стене, 7 – на стене (под утеплителем), 8 – на полу, 9 – на потолке, 10 – на полу, 11 – на потолке, 12 – на полу, 13 – на потолке, 14 – на стене, 15 – на стене, 16 – на стене

Fig. 5 - Temperature measurement scheme of sensors in laboratories: 1 – on the wall, 2 – on the wall, 3 – on the wall, 4 – on the street, 5 – on the window, 6 – on the wall (under the insulation), 8 – on the floor, 9 – on the hem, 10 – on the floor, 11 – on the floor, 12 – on the half, 13 – on the wall, 14 – on the wall, 15 – on the wall, 16 wall

Эксперименты проводились в два этапа: на 1-м этапе для обогрева помещений использовалась подвесная установка с 6 водяными инфракрасными излучателями длиной 125, 1 м каждый; на 2-м этапе помещение обогревалось двумя биметаллическими радиаторами (марка Calidor 500) по 12 секций каждый.

2.3 Исследование теплового режима наружных ограждающих конструкций / Research of the thermal regime of external enclosing structures

Цель исследования – изучение влияния лучистого отопления на теплозащитные характеристики наружных ограждающих конструкций [24]. Объектом исследования теплового режима была выбрана стена Лаборатории лучистого отопления ННГАСУ, она является частью лабораторной установки и оборудована системой, позволяющей варьировать толщину утеплителя от 0 до 150 мм. Во время эксперимента были установлены изоляционные панели марки «Пеноплэкс Основа» с коэффициентом теплопроводности $\lambda_Б$ = 0,032 Вт/(м·°С). В качестве измерительного оборудования использовался измеритель теплового потока марки «Теплограф», который включает в себя модуль-02. Измерения проводились в соответствии с методикой [9]. Схема эксперимента показана на рисунках 6 и 7.

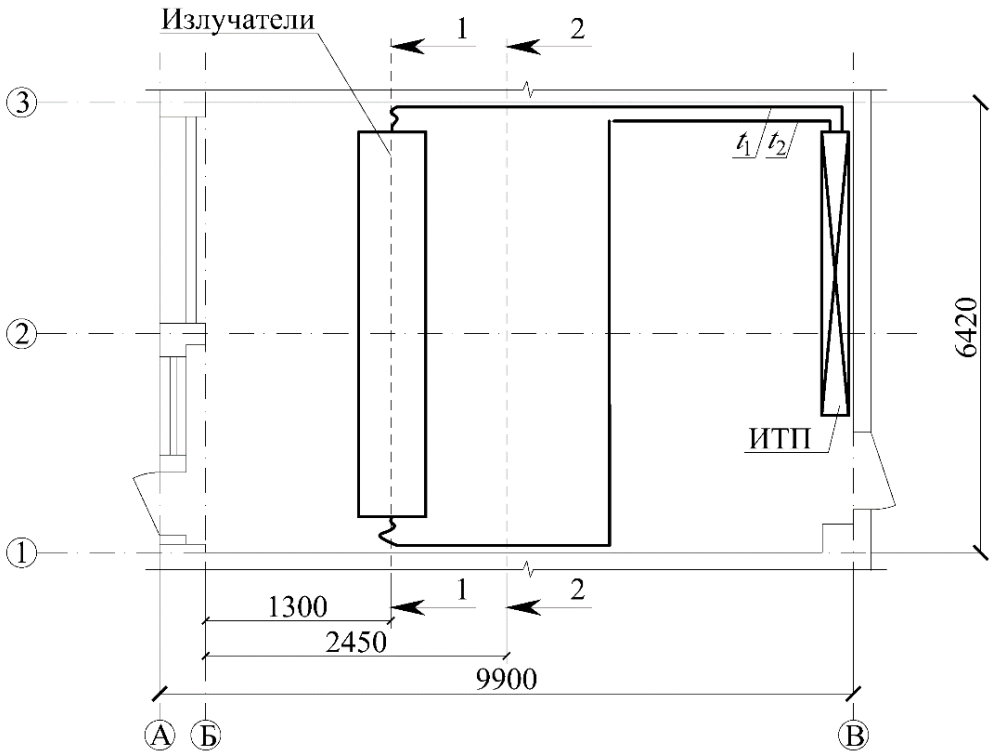


Рис. 6 - План Лаборатории лучистого отопления ННГАСУ
Fig. 6 - Plan of the Radiant Heating Laboratory of NNGASU

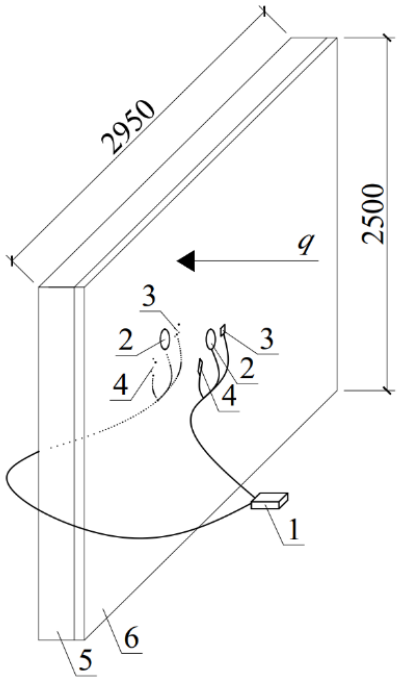


Рис. 7 - Испытательная установка в составе: 1 – прибор «Теплограф»; 2 – датчики плотности теплового потока; 3 – датчики температуры поверхности; 4 – датчики температуры воздуха; 5 – стена из силикатного кирпича; 6 – утеплитель «Пеноплэкс Основа»
Fig. 7 - Test setup consisting of: 1 – device «Teplograph»; 2 – heat flow density sensors; 3 – surface temperature sensors; 4 – air temperature sensors; 5 – silicate brick wall; 6 – insulation «Penoplex Osnova»

Эксперименты проводились в два этапа: на 1-м этапе для обогрева помещений использовалась подвесная установка с 6 водяными инфракрасными излучателями длиной 125, 1 м каждый; на 2-м этапе помещение обогревалось двумя биметаллическими радиаторами (марка Calidor 500) по 12 секций каждый.

3 Results and Discussion

Вследствие планирования экспериментальных исследований определяется минимально-необходимое число опытов и методика применения аппарата математической статистики для формализации результатов эксперимента [25, 26].

В научных и технических исследованиях применяется и достаточен следующий метод определения минимального количества измерений $n_{изм}$.

Рассчитывается среднее значение $\bar{x}$ измеренной величины x, исправленная дисперсия s^2 и среднеквадратическое отклонение σ, по следующим формулам:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{изм}} x_i}{n_{изм}}; \quad (2)$$

$$s^2 = \frac{1}{n_{изм} - 1} \sum_{i=1}^{n_{изм}} (x_i - \bar{x})^2; \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{s^2}. \quad (4)$$

Минимальное количество измерений должно удовлетворять условию:

$$n_{изм} \geq \left(\frac{t_{расп}\alpha}{\beta_0} \right)^2, \quad (5)$$

где: $t_{расп}$ – величина, распределенная по закону Стьюдента, определяемая в зависимости от числа степеней свободы $v = n_{изм} - 1$ и уровня значимости $q = (1 - \alpha)100$ %; β_0, α – доверительный интервал и доверительная вероятность, соответственно.

Распределение по закону Стьюдента справедливо для величины x, распределенной нормально, что требует оценки нормальности распределения, которая проводится с помощью безразмерных комбинаций центральных моментов распределения A и E по формулам:

$$\mathrm{A} = \frac{1}{s^3 (n_{изм} - 1)} \sum_{i=1}^{n_{изм}} (x_i - \bar{x})^3; \quad (6)$$

$$\mathrm{E} = \frac{1}{s^4 (n_{изм} - 1)} \sum_{i=1}^{n_{изм}} (x_i - \bar{x})^4. \quad (7)$$

Центральные моменты A и E для нормально распределенных величин равняются нулю. Если по результатам расчета A и E не равны нулю, оценивается собственная дисперсия D измеренных значений:

$$D(\mathrm{A}) = \frac{6(n_{изм} - 1)}{(n_{изм} + 1)(n_{изм} + 3)}; \quad (8)$$

$$D(\mathrm{E}) = \frac{24 n_{изм} (n_{изм} - 2)(n_{изм} - 3)}{(n_{изм} + 1)^2 (n_{изм} + 3)(n_{изм} + 5)}. \quad (9)$$

Распределение измеренных величин считается нормальным, если выполняются следующие условия:

$$|\mathrm{A}| \leq 3\sqrt{D(\mathrm{A})}; \quad (10)$$

$$|\mathrm{E}| \leq 5\sqrt{D(\mathrm{E})}. \quad (11)$$

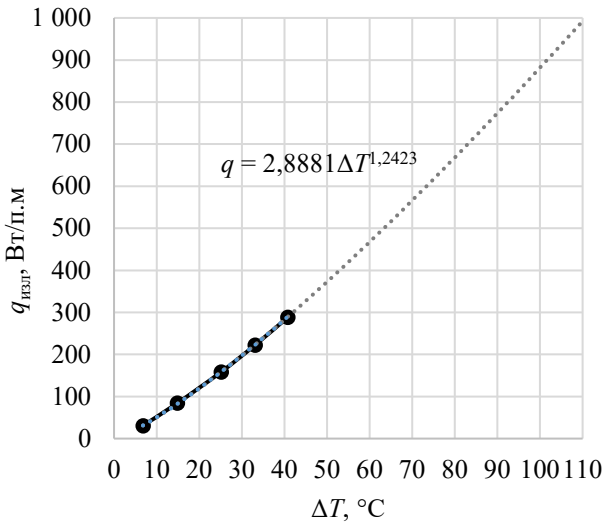
В процессе проведения испытания моделей нами было принято следующее число проводимых одинаковых измерений. Измерение температуры теплоносителя T_1, °C, T_2, °C, проводить три раза; расхода теплоносителя G_1, кг/ч, G_2, кг/ч, проводить три раза; измерение общей мощности системы $Q_{общ}$, Вт проводить три раза; измерение плотности лучистого теплового потока $E_{изл}$, Вт/м^2 проводить три раза. Далее приведены результаты экспериментов, прошедшие математическую обработку.

3.1 Исследование удельной теплоотдачи излучателей / Research of the specific heat transfer of emitters

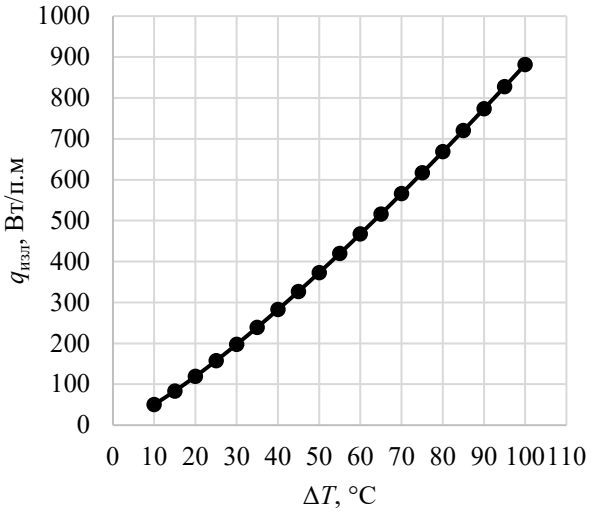
Результаты проведенных исследований по определению удельной тепловой мощности 1 п.м излучателей были подвергнуты математической обработке двумя методами: математическое моделирование линии тренда в программном комплексе MathCAD и построение линейной регрессии в логарифмическом масштабе [27]. Результаты исследований Helios 750 до и после математической обработки приведены в таблице 2 и на рисунке 8.

Таблица 2. Удельная мощность Helios 750 при фиксированных значениях ΔT
Table 2. The specific power of Helios 750 at fixed values ΔT

ΔT, ºС	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$q_{изл}$, Вт/п.м	50,46	83,51	119,38	157,52	197,56	239,26	282,43	326,94	372,66	419,50	467,39	516,26	566,04	616,70	668,18	720,45	773,47	827,21	881,64



а
a



б
b

Рис. 8 - Результаты исследования удельной тепловой мощности излучателя Helios 750: а – после определения погрешности; б – после математической обработки
Fig. 8 - The results of the study of the specific thermal power of the Helios 750 radiator: a – after determining the error; b – after mathematical processing

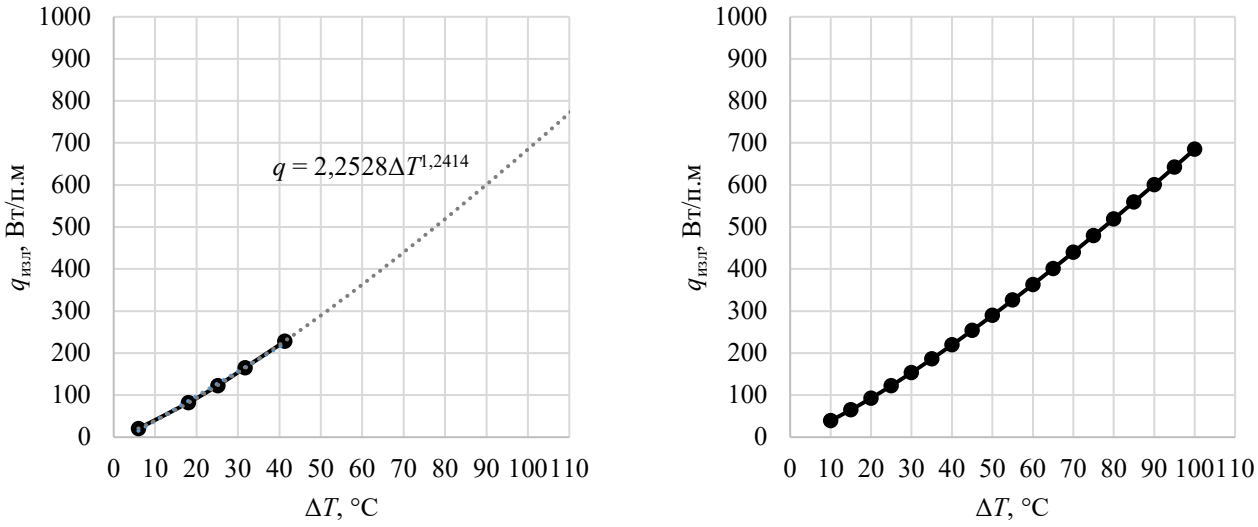
В результате математических преобразований было получено уравнение для кривой удельной мощности для Helios 750:

$$q_{изл}^{H750} = 2{,}8881 \cdot \Delta T^{1{,}2423}. \quad (12)$$

Результаты исследований Flower 125 до и после математической обработки приведены в таблице 3 и на рисунке 9.

Таблица 3. Удельная мощность Flower 125 при фиксированных значениях ΔT
Table 3. The specific power of Flower 125 at fixed values ΔT

ΔT, ºС	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$q_{изл}$, Вт/п.м	39,28	64,98	92,87	122,51	153,63	186,03	219,57	254,15	289,66	326,04	363,24	401,19	439,85	479,18	519,15	559,73	600,89	642,61	684,86



а
a

б
b

Рис. 9 - Результаты исследования удельной тепловой мощности излучателя Flower 125: а – после определения погрешности; б – после математической обработки
Fig. 9 - The results of the study of the specific thermal power of the Flower 125 radiator: a – after determining the error; b – after mathematical processing

В результате математических преобразований было получено уравнение для кривой удельной мощности для Flower 125:

$$q_{изл}^{F125} = 2,2528 \cdot \Delta T^{1,2414}. \quad (13)$$

По итогу исследования были получены: таблица зависимости удельной мощности $q_{изл}$, Вт/п.м отопительных приборов от температурного перепада $\Delta T = (T_1+T_2)/2 - t_в$, °С (таблицы 2, 3); диаграммы, которые наглядно отображают эту зависимость (рисунки 8, 9); и уравнения, которые достоверно описывают эти диаграммы (12, 13).

После анализа полученных результатов мы можем провести сравнительный анализ водяных инфракрасных излучателей, представленных на рынке России и мира (таблица 4).

Таблица 4. Сравнение водяных инфракрасных излучателей различных марок
Table 4. Comparison of water infrared emitters of various brands

Марка (производство)	Мощность 1 м прибора при ΔT = 55 °С, Вт/п.м	Стоимость 1 п.м прибора, руб.*	**Стоимость 1 Вт мощности, руб.**
Helios 750 (Россия)	**419,50**	6000	**14,30**
Flower 125 (Россия)	**326,04**	4000	**12,27**
Водяная излучающая панель (Россия)	248,00	5000	**20,16**
Водяная излучающая панель (Германия)	264,00	9000	**34,09**

* по состоянию на январь 2022 г.

3.2 Исследование температурного режима помещения / Research of the room temperature regime

В результате исследования температурного режима помещения при лучистом и конвективном отоплении, а также обработки полученных результатов были получены следующие

результаты (рисунок 10) [28].

По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Показания датчиков, расположенных на стене над радиаторами во время 2-го этапа эксперимента, были значительно выше, поскольку они расположены рядом с радиаторами.

2. Показания датчиков, расположенных на стене, свободной от нагревательных приборов, во время 1-го и 2-го этапов эксперимента незначительно отличались, в результате можно говорить о схожем температурном режиме в рабочей зоне помещения.

3. Показания датчиков, расположенных на полу, в случае использования лучистого отопления выше, чем в случае использования конвективного отопления, что обусловлено более высокой плотностью излучения поверхности пола.

4. Показания датчиков, которые расположены на внешних ограждающих конструкциях, выше при лучистом нагреве из-за более высокой плотности излучения поверхности стен и окна.

5. Показания датчиков, расположенных на потолке отапливаемых помещений, в случае использования лучистого отопления значительно ниже, чем при использовании конвективного отопления. Можно отметить меньший температурный градиент при использовании лучистого нагрева, даже учитывая тот факт, что датчики дополнительно облучаются, а один из датчиков располагался непосредственно над излучателями.

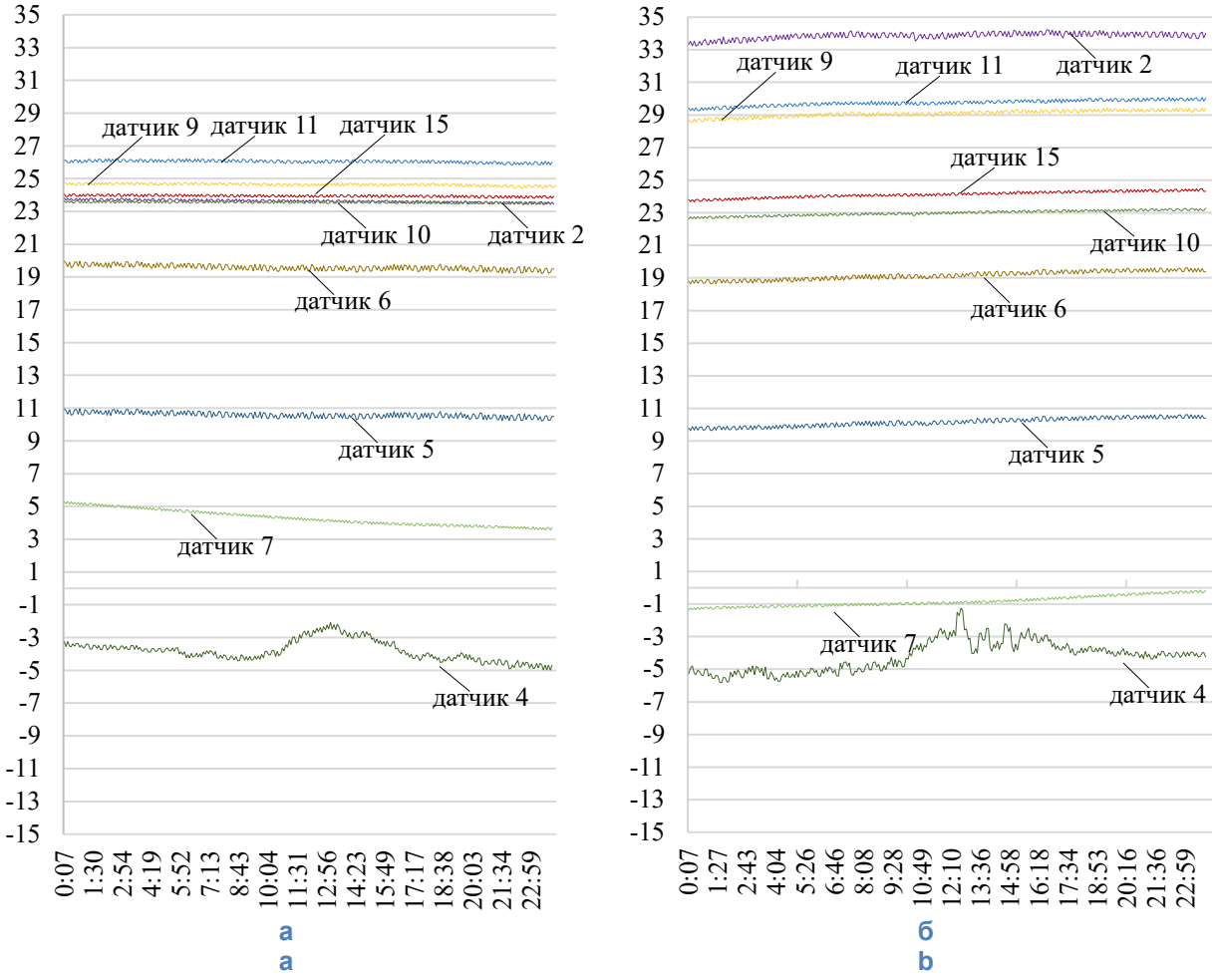


Рис. 10 - Показания характерных датчиков при исследовании температурного режима помещения: а – на 1 этапе при лучистом отоплении; б – на 2 этапе при конвективном отоплении

Fig. 10 - Indications of characteristic sensors in the study of the temperature regime of the room: a – at the 1st stage with radiant heating; b – at the 2nd stage with convective heating

3.3 Исследование теплового режима наружных ограждающих конструкций / Research of the thermal regime of external enclosing structures

В ходе экспериментов были выбраны два дня, которые были схожи по климатическим условиям. Кроме того, были выровнены температуры подачи теплоносителя, а также мощность систем лучистого и конвективного отопления [29, 30]. Результаты исследования представлены на

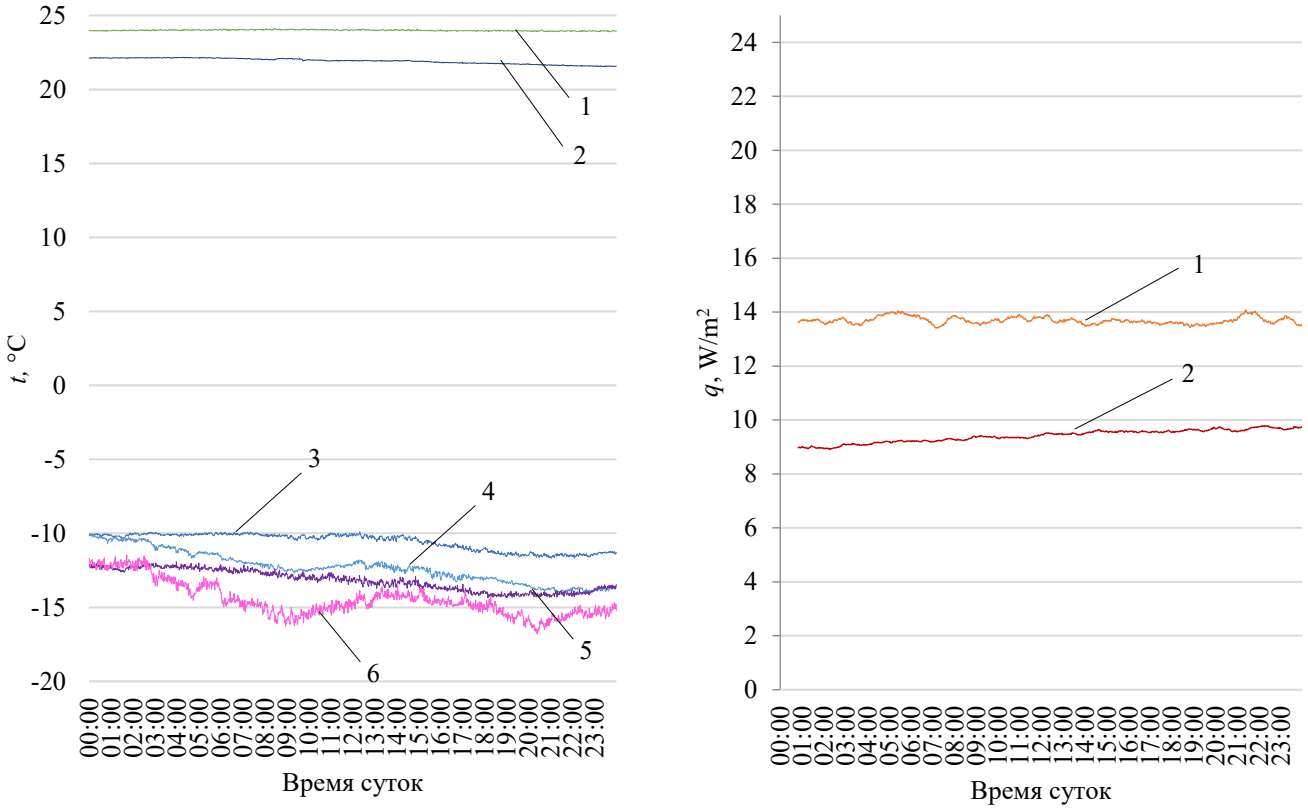
рисунке 11.

На основе анализа полученных графиков можно сделать следующие выводы:

1. Как уже упоминалось в 3.2 – отсутствие облучения внешней стены сказалось на показателях расположенных на ней датчиков температуры, они значительно снизились.

2. Температурный напор и, как следствие, тепловой поток на 1-м этапе эксперимента были выше, чем на 2-м этапе.

3. Температурный напор между температурой внешней поверхности и температурой внутреннего воздуха во время 1-го этапа эксперимента был выше, чем во время 2-го этапа, что указывает на более высокую относительную температуру внешней поверхности облучаемого корпуса.



а

а

б

b

Рис. 11 - Показания датчиков в ходе эксперимента. а – показания температурных датчиков: 1 – температура на внутренней поверхности (1 этап), 2 –- температура на внутренней поверхности (2 этап), 3 – температура на наружной поверхности (1 этап), 4 – температура на наружной поверхности (2 этап), 5 – температура наружного воздуха (1 этап), 6 – температура наружного воздуха (2 этап); б – показания датчиков плотности теплового потока (1 – на 1 этапе при лучистом отоплении, 2 – на 2 этапе при конвективном отоплении)

Fig. 11 - Sensor readings during the experiment. a – temperature sensor readings: 1 – temperature on the inner surface (stage 1), 2 – temperature on the inner surface (stage 2), 3 - temperature on the outer surface (stage 1), 4 – temperature on the outer surface (stage 2), 5 – outdoor temperature (stage 1), 6 – outdoor air temperature (stage 2); b – readings of heat flux density sensors (1 – at stage 1 for radiant heating, 2 – at stage 2 for convective heating)

4 Заключение / Conclusions

Более ранние исследования не проводили всесторонний анализ формирования теплового и температурного режима помещений с системами отопления на базе водяных инфракрасных излучателей, так как более распространены работы на тему газового лучистого отопления, которое имеет ряд отличительных особенностей (большая плотность излучения, значительно большая температура поверхности приборов и др.). В результате проведённых нами исследований можно сделать следующие выводы:

1. Водяные инфракрасные излучатели марок Helios 750 и Flower 125 производимые в России имеют удельную по мощности стоимость ниже, чем у конкурирующих водяных инфракрасных панелей.

2. Система лучистого отопления на базе водяных инфракрасных профилей позволяет снизить градиент температуры воздуха по высоте по сравнению с конвективной системой отопления не только в крупнообъёмных помещениях, таких как: цеха, депо, спортзалы, но и в помещениях с малой высотой расположения покрытия. Данная особенность позволяет снизить тепловые потери через покрытие.

3. Система водяного лучистого отопления за счёт большого коэффициента лучистой теплоотдачи имеет высокую плотность инфракрасного излучения, которое, в свою очередь, нагревает поверхности наружных ограждений, что повышает их температуру и позволяет защитить помещения от выпадения конденсата, но, в то же время, провоцирует большие тепловые потери.

4. Температурный режим в рабочей зоне помещения с применением водяного лучистого отопления, по сравнению с конвективным, остаётся неизменным, но можно снизить температуру внутреннего воздуха помещения, что не скажется на тепловом ощущении человека, находящегося в нём, что позволит снизить трансмиссионные тепловые потери.

5. Высокая 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 теплопотери;
- меньшая тепловая инерция, которая позволяет увеличить время дежурного режима работы системы отопления и снизить длительность переходного режима.

5 Благодарности / Acknowledgements

Мы благодарим компанию Flaig + Hommel GmbH и компанию ООО «Флайг+Хоммель» за предоставленные для тестирования образцы водяных инфракрасных излучателей Helios 750 и Flower 125.

References

1. Bashmakov, I.A. Analiz osnovnyh tendencij razvitija sistem teplosnabzhenija v Rossii i za rubezhom // Novosti teplosnabzhenija. – 2008. – №2 (90). (In Russian)
2. Bodrov, V.I. Temperaturnyj rezhim naruzhnyh ograzhdenij pomeshhenij s sistemami otoplenija na baze gazovyh infrakrasnyh izluchatelej / V.I. Bodrov, L.Ju. Mihajlova, A.A. Smykov // Privolzhskij nauchnyj zhurnal. – 2015. – № 2 (34). – S. 58-64. (In Russian)
3. Bodrov M.V. Issledovanie teplovogo rezhima pomeshhenija, oborudovannogo sistemoj luchistogo otoplenija na baze vodjanyh infrakrasnyh izluchatelej i jekonomicheskoj jeffektivnosti dannogo reshenija / A.A. Smykov, M.V. Bodrov, V.P. Boldin // Santehnika, Otoplenie, Kondicionirovanie. – 2021. – № 5 (223). – S. 38-41. (In Russian)
4. Bodrov M. Energy efficiency of radiant heating systems based on water-based radiant profiles / M. Bodrov, A. Smykov, M. Morozov // Civil Engineering Journal. – 2021. – Vol. 9, № 5. – P. 1546-1557. OI:10.13189/cea.2021.090525.
5. Smykov A.A. Teplovoj i temperaturnyj rezhim pomeshhenij s sistemami otoplenija na osnove vodjanyh infrakrasnyh izluchatelej / A.A. Smykov // Privolzhskij nauchnyj zhurnal. – 2021. – № 2 (58). – S. 98-106. (In Russian)
6. Fanger, P.O. Calculation of thermal comfort: introduction of a basic comfort equation / P.O. Fanger // ASHRAE Transaction. – 1967. – Vol. 73. – P. III4.1…III4.20.
7. Kuznetsov, G.V. Experimental determination of the temperature in a small neighborhood of the gas infrared sources / G.V. Kuznetsov, N.I. Kurilenko, G.Y. Mamontov, L.Y. Mikhaylova // EPJ Web of Conferences. – 2015. – № 82 – 01021p.1…01021.p.4. DOI:10.1051/epjconf/20158201021.

8. Maksimov, V.I. Verification of Conjugate Heat Transfer Models in a Closed Volume with Radiative Heat Source / V.I. Maksimov, T.A. Nagornova, N.I. Kurilenko // MATEC Web of Conferences. – 2016. – № 72. – 01061p.1…01061.p.5. DOI:10.1051/matecconf/20167201061.
9. Jung, N. Energy performance analysis of an office building in three climate zones / N. Jung, S. Paiho, J. Shemeikka, R. Lahdelma, M. Airaksinen // Energy and Buildings. – 2018. – № 158. – P. 1023–1035. DOI:10.1016/j.enbuild.2017.10.030.
10. Skunce, G. Warmetechnischer, Vergleich zwischen Warmluft – und Strahlungsheizung / G. Skunce // Gaswarme intemational. – 1973. – № 7. – P. 252…255.
11. Imanari, T. Thermal comfort and energy consumption of the radiant ceiling panel system. Comparison with the conventional all-air system / T. Imanari, T. Omori, K. Bogaki // Energy and Buildings. – 1999. – № 30(2). – P. 167–175. DOI:10.1016/S0378-7788(98)00084-X.
12. Kollmar, A. Die Strahlungsheizung / A. Kollmar, W. Liese – Munchen: Springer, 1957. – 142 p.
13. Dudkiewicz, E. The influence of orientation of a gas-fired direct radiant heater on radiant temperature distribution at a workstation / E. Dudkiewicz, J. Jezowiecki // Energy and Buildings. – 2011. – № 43(6). – P. 1222–1230. DOI:10.1016/j.enbuild.2010.12.030.
14. SP 60.13330.2020 Otoplenie, ventiljacija i kondicionirovanie vozduha. – M.: Standartinform, 2021. – 25 s.
15. Fonseca, N. Radiant ceiling systems coupled to its environment part 1: Experimental analysis / N. Fonseca, C. Cuevas, V. Lemort // Applied Thermal Engineering. – 2010. – № 14-15(30). – P. 2187…2195. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2010.05.033.
16. Fonseca, N. Radiant ceiling systems coupled to its environment part 2: Dynamic modeling and validation / N. Fonseca, S. Bertagnolio, C. Cuevas // Applied Thermal Engineering. – 2010. – № 14-15(30). – P. 2196…2203. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2010.05.032.
17. Rhee, K.N. A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment / K.N. Rhee, K.W. Kim // Building and Environment. – 2015. – № 91. – P. 166–190. DOI:10.1016/j.buildenv.2015.03.040.
18. Rhee, K.N. Ten questions about radiant heating and cooling systems / K.N. Rhee, B.W. Olesen, K.W. Kim // Building and Environment. – 2017. – № 112. – P. 367–381. DOI:10.1016/j.buildenv.2016.11.030.
19. Fonseca, N. Experimental analysis and modeling of hydronic radiant ceiling panels using transient-state analysis / N. Fonseca // International Journal of Refrigeration. – 2011. – № 4(34). – P. 958…967. DOI:10.1016/j.ijrefrig.2011.01.007.
20. Kuznetsov, G.V. Mathematical modelling of conjugate heat transfer and fluid flow inside a domain with a radiant heating system / G.V. Kuznetsov, N.I. Kurilenko, A.E. Nee // International Journal of Thermal Sciences. – 2018. – № 131. – P. 27…39. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2018.05.010.
21. Jia, H. Experimentally-determined characteristics of radiant systems for office buildings / H. Jia, X. Pang, P. Haves // Applied Energy. – 2018. – № 221. – P. 41…54. DOI:10.1016/j.apenergy.2018.03.121.
22. Bojić, M. Performances of low temperature radiant heating systems / M. Bojić, D. Cvetković, V. Marjanović, M. Blagojević, Z. Djordjević // Energy and Buildings. – 2013. – № 61. – P. 233…238. DOI:10.1016/j.enbuild.2013.02.033.
23. Yin, Y.L. Experimental investigation on the heat transfer performance and water condensation phenomenon of radiant cooling panels / Y.L. Yin, R.Z. Wang, X.Q. Zhai, T.F. Ishugah // Building and Environment. – 2014. – № 71. – P. 15…23. DOI:10.1016/j.buildenv.2013.09.016.
24. Kavga, A. Performance of an infrared heating system in a production greenhouse / A. Kavga, E. Karanastasi, I. Konstas, T. Panidis // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). – 2013. – № 46(18, part 1). – P. 235–240. DOI:10.3182/20130828-2-SF-3019.00017.
25. Ermakov, S.M. Matematicheskaja teorija planirovanija jeksperimenta / S.M. Ermakov. – M.: Nauka, 1983. – 392 s.
26. Zajdel', A.N. Pogreshnost' izmerenij fizicheskih velichin / A.N. Zajdel' – L.: Nauka, 1985. – 112 s.
27. Yaglou, C.P. A method of improving the effective temperature index / C.P. Yaglou – ASHRAE, 1974 – 307 p.

28. Chrenko, F.A. Heated ceiling and comfort / F.A. Chrenko // Journal IHVE. – 1973. – № 20 – P. 68…75.
29. Pollman, F. Heizen Infrared / F. Pollman // Machinenmarkt. – 1969. – № 55. – P. 1261–1262.
30. Kurilenko, N.I. Comparative analysis of methods of calculating the systems for radiation heating / N.I. Kurilenko, D.M. Zverev, A.Z. Idrisov // Gazovaya Promyshlennost. – 2001. – № 5. – P. 58–60.