



УДК 697.1:621.565.83

М. В. БОДРОВ, д-р техн. наук, зав. кафедрой отопления и вентиляции;
А. Е. РУИН, ассистент кафедры отопления и вентиляции; **А. А. СМЫКОВ**,
канд. техн. наук, доц. кафедры отопления и вентиляции; **А. Д. ЕЛИЗАРОВ**,
магистрант кафедры отопления и вентиляции

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОФИЛЕЙ СИСТЕМ РАДИАЦИОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

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: водяное охлаждение, теплофизика, энергосбережение, энергоэффективность, радиационное охлаждение.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований алюминиевых профилей Flower 225, применяемых в низкотемпературных системах радиационного охлаждения. Представлены основные результаты экспериментального исследования теплотехнических характеристик исследуемых профилей, а также математические зависимости мощности охлаждающего профиля от температурного напора. Авторами разработаны методические рекомендации по расчету систем радиационного охлаждения на базе водяных охлаждающих профилей.

Введение

В виду постоянной тенденции роста цен энергетических ресурсов, вопрос о снижении энергопотребления зданий и сооружений является актуальным в наше время. Кроме того, ископаемое топливо, которое имеет в настоящее время наибольшую популярность для выработки тепловой и электрической энергии, ограничивается природными запасами. Эти факторы вынуждают применять новые инновационные энергосберегающие технологии и системы, которые позволят максимально рационально использовать энергетические ресурсы.

Одним из таких решений является применение реверсивных радиационных систем отопления и охлаждения. Данные системы обеспечения параметров микроклимата позволяют снизить энергопотребление зданием как в холодный период года, так и в теплый. Снижение потребляемой тепловой и электрической энергии происходит за счет более высокой (в режиме работы – отопление [1–4]) или более низкой (в режиме работы – охлаждение [5]) радиационной температуры обслуживаемого системой помещения. Это позволяет обеспечить более комфортные параметры микроклимата при более высокой (система охлаждения) [6] или более низкой (система отопления) температуре внутреннего воздуха. При этом применение одной и той же системы для разных режимов работы (отопление и охлаждение) позволяет снизить капитальные вложения к минимуму [7–10].

Авторами отмечается, что реверсивные системы радиационного отопления и охлаждения в настоящее время являются недостаточно изученными и нуждаются в дополнительных как в теоретических, так и натурных исследованиях, а

существующие методические рекомендации по расчету и проектированию таких систем являются неактуальными и устаревшими. Результаты исследований низкотемпературных лучистых систем отопления были опубликованы ранее в таких научных трудах, как [2–4].

В настоящей статье приведены результаты лабораторных исследований теплотехнических характеристик охлаждающих профилей радиационных систем охлаждения.

Материалы и методы исследований

Исследования, посвященные изучению теплотехнических характеристик охлаждающих профилей систем радиационного охлаждения, проводились в учебно-научно-исследовательском центре «СОНИИ», основанном в ННГАСУ в 2019 году (рис. 1). Учебно-научно-исследовательский центр оснащен рядом исключительных контрольно-измерительных приборов, необходимых для изучения тепло-влажностного режима помещения и теплотехнических параметров оборудования [2–4].

Объектом исследования является охлаждающий профиль *Flower 225* из сплава алюминия AlMgSi0.5, который в последующем подвергается анодированию. В связи с этим опытный образец имеет высокие антикоррозионные характеристики и способен выдержать достаточно высокие температуры, поэтому максимальная рабочая температура ограничивается только характеристиками источника теплоты. Внешний вид и основные технические характеристики профиля *Flower 225*, предоставленного для теплотехнических испытаний промышленным партнером ННГАСУ ООО «Флайт+Хоммель», приведены в табл. 1.



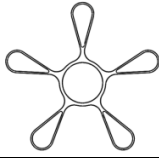
Рис. 1. Общий вид Лаборатории лучистого отопления

Целью лабораторных испытаний было определение фактической удельной мощности 1 п. м охлаждающего профиля $q_{\text{изл}}$, Вт. Испытание проводилось при помощи индивидуальной лабораторной установки, схема которой представлена на рис. 2. Лабораторная установка представляет собой комплекс контрольно-измерительных приборов, оборудования и системы уникального подвеса для изменения пространственного положения испытуемых профилей в объеме помещения лаборатории.



Таблица 1

Основные характеристики профиля *Flower 225*

Характеристики	Ед. изм.	Марка излучателя
		<i>Flower 225</i>
Внешний вид профиля		
Вид поперечного сечения	-	
Материал	-	AlMgSi0,5
Размеры	мм	225x225
Удельная площадь	м ² /п.м	1,07
Удельная емкость	л/п.м	2,5
Удельная масса профиля	кг/п.м	8,6
Удельная масса профиля с водой	кг/п.м	11,1
Подключение	дюйм	2
Максимальное рабочее давление (испытательное давление)	бар	6,5 (10)
Максимальная рабочая температура теплоносителя	°C	150

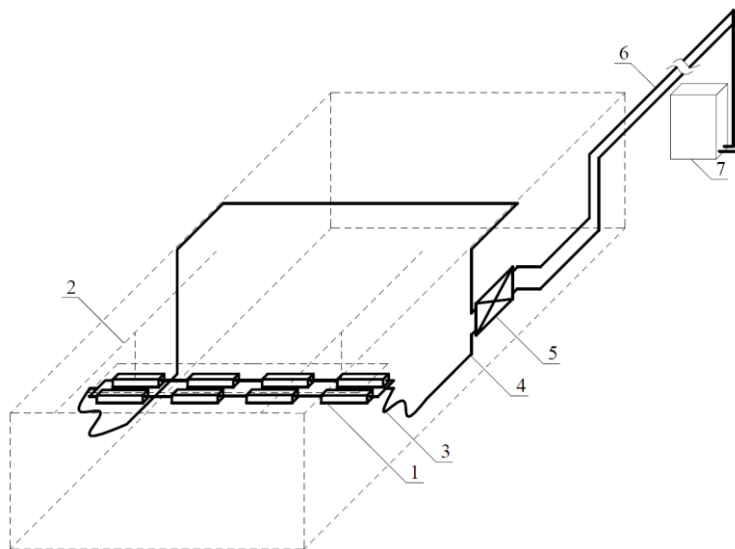


Рис. 2. Схема лабораторной установки: 1 – испытуемые образцы профилей; 2 – передвижная система подвеса; 3 – гибкая подводка; 4 – транзитные трубопроводы; 5 – узел регулирования; 6 – транзитные трубопроводы от холодильной машины; 7 – холодильная машина (чиллер)



В ходе проведения испытаний замерялись и вычислялись математически следующие величины:

T_1 – температура теплоносителя в подающем трубопроводе, °С;

T_2 – температура теплоносителя в обратном трубопроводе, °С;

G_1 – массовый расход теплоносителя в подающем трубопроводе, кг/ч;

G_2 – массовый расход теплоносителя в обратном трубопроводе кг/ч;

N – количество включенных излучателей, шт.;

$Q_{тр}$ – транзитные тепловые потери, Вт, измеренные экспериментально;

$Q_{общ}$ – общее количество поглощенной лабораторной установкой теплоты,

Вт;

ΔT – температурный напор, °С, определяемый по формуле (1):

$$\Delta T = \frac{T_1 + T_2}{2} - t_v; \quad (1)$$

t_v – температура внутреннего воздуха, °С.

Для вычисления удельной мощности 1 п. м излучателя в лабораторных условиях использовалось следующее уравнение:

$$q_{изл} = \frac{\left(\frac{G_1 \cdot c_{T_1} \cdot T_1}{3600} - \frac{G_2 \cdot c_{T_2} \cdot T_2}{3600} - Q_{тр} \right)}{N}, \text{ Вт/п.м.}, \quad (2)$$

где c_{T_1} и c_{T_2} – теплоемкость воды в подающем и обратном трубопроводе, соответственно, Дж/(кг·°С).

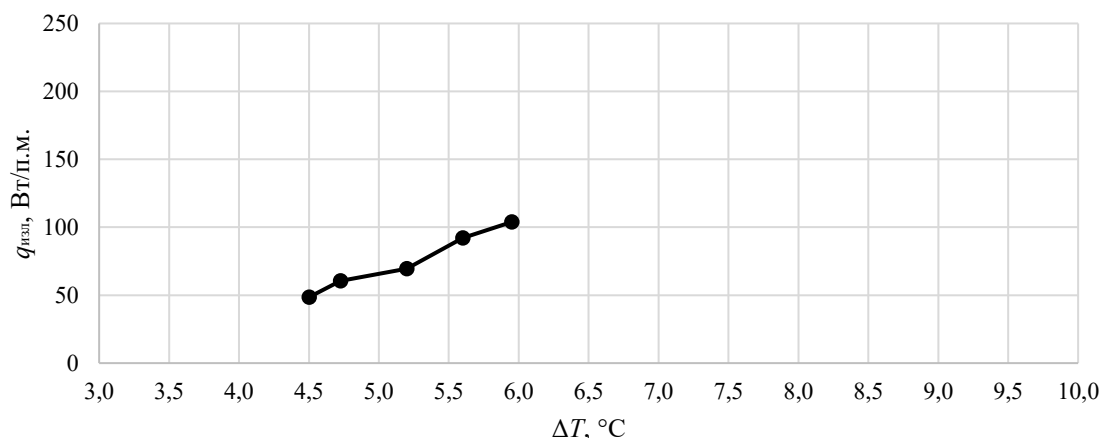
Результаты исследований

Результаты проведенных экспериментальных исследований по определению удельной тепловой мощности 1 п. м профиля *Flower 225* после проведения математической обработки приведены в табл. 2 и на рис. 3.

Таблица 2

Полученные экспериментальные данные для определения удельной тепловой мощности профиля *Flower 225*

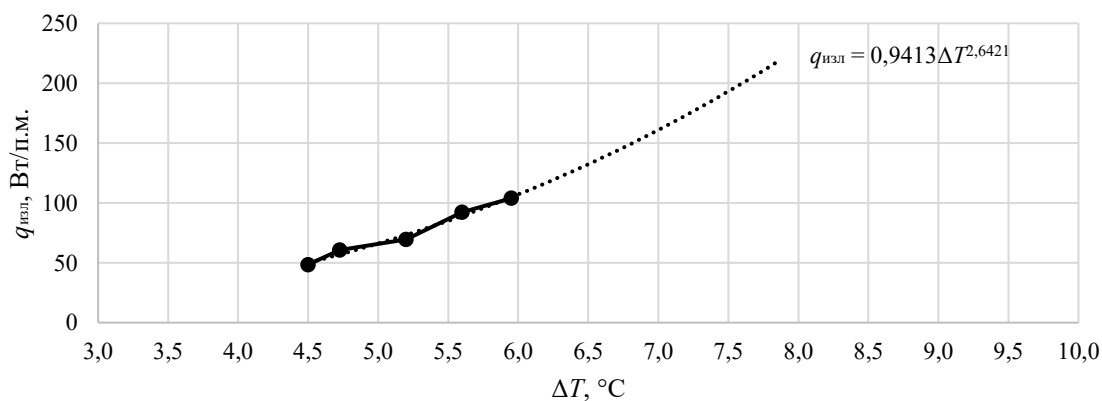
№ опыта п/п	N , шт	T_1 , °С	T_2 , °С	G_1 , кг/ч	G_2 , кг/ч	c_{T_1} , Дж/кг·°С	c_{T_2} , Дж/кг·°С	$Q_{общ}$, Вт	$Q_{тр}$, Вт	$q_{изл}$, Вт/п.м	t_v , °С	ΔT , °С
1	6	18,1	18,5	537,20	539,17	4183,9	4183,5	-61,92	13,44	-48,48	22,8	-4,50
2	6	18,2	18,8	532,00	533,15	4183,8	4183,2	-74,69	14,08	-60,61	23,2	-4,73
3	6	18,4	19,0	539,17	541,12	4183,6	4183,0	-85,22	15,68	-69,54	23,9	-5,20
4	6	18,4	19,2	551,16	553,09	4183,6	4182,8	-109,15	16,96	-92,19	24,4	-5,60
5	6	18,4	19,3	557,15	559,07	4183,6	4182,7	-121,77	17,92	-103,85	24,8	-5,95

Рис. 3. Результаты экспериментальных испытаний профиля *Flower 225*

Для определения зависимости удельной тепловой мощности охлаждающего профиля при различном температурном напоре $\Delta T, ^\circ\text{C}$, требуется установить численное значение a и m для эмпирического уравнения:

$$q_{\text{изл}} = a \cdot \Delta T^m. \quad (3)$$

В дальнейшем была проведена дополнительная математическая обработка для построения зависимости на основе полученных экспериментальных данных. Определение показателей a и m для эмпирического уравнения осуществлялось путем моделирования линии тренда в программном комплексе *MathCAD*, результаты которого приведены на рис. 4.

Рис. 4. Результаты моделирования степенной линии тренда в программном комплексе *MathCAD* для охлаждающего профиля *Flower 225*

В результате математической обработки уравнение (3), для нашего расчетного случая будет иметь вид:

$$q_{\text{изл}} = 0,9413 \cdot \Delta T^{2,6421}. \quad (4)$$

Заключение

Полученные экспериментальные данные и теплофизические зависимости позволяют корректно и достоверно определить удельную тепловую мощность



профилей *Flower 225* для систем радиационного охлаждения в теплый период года.

Высокой энергоэффективности от применения радиационных систем охлаждения можно добиться за счет следующих критериев:

- их применение позволяет уменьшить температурный градиент по высоте помещения и, как следствие, обеспечить более равномерное распределение температур по помещению;

- позволяет поддерживать более высокую температуру в рабочей зоне помещения за счет более низкой радиационной температуры, что позволяет снизить тепловой поток от внешней окружающей среды;

- меньшая тепловая инерция позволяет быстрее реагировать на изменение температуры наружного воздуха и на изменение интенсивности солнечной радиации.

В дальнейшем планируется продолжение исследований температурного режима помещений, оборудованных системами радиационного охлаждения, а также применение их в круглогодичном цикле эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Российская Федерация. Президент. О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации : указ Президента Российской Федерации от 28.02.2024 № 145. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный.
2. Колпаков, Г. В. Регулирование микроклимата в условиях летнего перегрева зданий / Г. В. Колпаков. – Москва : Стройиздат, 1970. – 175 с.
3. Исследование теплотехнических характеристик водяных инфракрасных излучателей для энергоэффективных систем лучистого отопления / М. В. Бодров, Д. А. Кузнецов, А. А. Смыков, А. Е. Руин // Академия. Архитектура и строительство. – 2023, № 2. – С. 160–167.
4. Смыков, А. А. Испытания лабораторной модели лучистой системы отопления на базе водяных инфракрасных излучателей / М. В. Бодров, А. А. Смыков // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2023. – № 3. – С. 40–41.
5. Бодров, М. В. Повышение энергоэффективности производственных зданий за счет применения лучистых систем отопления на базе водяных инфракрасных излучателей / М. В. Бодров, А. А. Смыков, А. Е. Руин // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2022. – № 8. – С. 26–30.
6. Shikha, A. A. Radiant cooling systems for high performance buildings / A. A. Shikha // Journal of international academic research for multidisciplinary. – 2015. – Vol. 3. – P. 126–133.
7. Ziarani, N. N. Anticipating an efficient relative humidity in a room under direct solar radiation and equipped by radiant cooling panel system / N. N. Ziarani, A. P. Haghighi // International Journal of Refrigeration. – 2019. – Vol. 98. – P. 98–108. – DOI 10.1016/j.ijrefrig.2018.10.018.
8. The effect of mineral micro particle in coating on energy consumption reduction and thermal comfort in a room with a radiation cooling panel in different climates / Sheikhzadeh G. A., Azemati A. A., Khorasanizadeh H. [et al.] // Energy and Buildings. – 2014. – Vol. 82. – P. 644–650. – DOI 10.1016/j.enbuild.2014.07.043.
9. Zhang, H. Methodology research on solving non-steady state radiation heat transfer in the room with Ceiling Radiant Cooling Panels / H. Zhang, N. Li, L. Su // International Journal of Refrigeration. – 2015. – Vol. 58. – P. 110–120. – DOI 10.1016/j.ijrefrig.2015.06.009.
10. Karadog, R. New approach relevant to total heat transfer coefficient including the effect of radiation and convection at the ceiling in a cooled ceiling room / R. Karadog // Applied



Thermal Engineering. – 2009. – Vol. 29. – P. 1561–1565. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2008.07.005.

BODROV Mikhail Valerevich, doctor of technical sciences, professor, holder of the chair of heating and ventilation; RUIN Aleksey Evgenevich, assistant of the chair of heating and ventilation; SMYKOV Aleksandr Anatolevich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of heating and ventilation; ELIZAROV Aleksandr Dmitrievich, master degree student of the chair of heating and ventilation

INVESTIGATION OF THERMAL CHARACTERISTICS OF PROFILES IN RADIANT COOLING SYSTEMS

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (831) 430-54-92; e-mail: tes84@inbox.ru

Key words: water cooling, thermophysics, energy saving, energy efficiency, radiant cooling.

The article presents the results of experimental studies of Flower 225 aluminum profiles used in low-temperature radiant cooling systems. The main results of the experimental study of the thermal characteristics of the profiles under investigation, as well as the mathematical dependencies of the cooling profile's capacity on the temperature difference, are presented. correlations for their cooling capacity as a function of the temperature difference. The authors have developed methodological recommendations for calculating radiation cooling systems based on water cooling profiles.

REFERENCES

1. Rossiyskaya Federatsiya. Prezident. O Strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii [On the Strategy of Scientific and Technological Development of the Russian Federation] : ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 28.02.2024 № 145 [Decree of the President of the Russian Federation dated February 28, 2024 No. 145]. URL: <http://www.consultant.ru>.
2. Kolpakov G. V. Regulirovanie mikroklimata v usloviyakh letnego peregreva zdaniy [Microclimate control in conditions of summer overheating of buildings]. Moscow, Stroyizdat, 1970, 175 p.
3. Bodrov M. V., Kuznetsov D. A., Smykov A. A., Ruin A. E. Issledovanie teploekhnicheskikh kharakteristik vodyanykh infrakrasnykh izluchateley dlya energoeffektivnykh sistem luchistogo otopeniya [Investigation of the thermal characteristics of water infrared emitters for energy-efficient radiant heating systems]. Akademiya. Arkhitektura i stroitelstvo [Academy. Architecture and Construction]. Moscow, 2023, № 2, P. 160–167.
4. Smykov A. A., Bodrov M. V. Ispytaniya laboratornoy modeli luchistoy sistemy otopeniya na baze vodyanykh infrakrasnykh izluchateley [Testing of a laboratory model of a radiant heating system based on water infrared emitters]. Santekhnika, Otoplenie, Konditsionirovanie [Sanitary Engineering, Heating, Air Conditioning]. Moscow, 2023, № 3, P. 40–41.
5. Bodrov M. V., Smykov A. A., Ruin A. E. Povyshenie energoeffektivnosti proizvodstvennykh zdaniy za schet primeneniya luchistyykh sistem otopeniya na baze vodyanykh infrakrasnykh izluchateley [Increasing the energy efficiency of industrial buildings through the use of radiant heating systems based on water infrared emitters]. Ventilyatsiya,



otoplenie, konditsionirovanie vozdukha, teplosnabzhenie i stroitelnaya teplofizika [Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics]. Moscow, 2022, № 8, P. 26–30.

6. Shikha A. A. Radiant cooling systems for high performance buildings. Journal of international academic research for multidisciplinary. 2015, Vol. 3, P. 126–133.

7. Ziarani N. N., Haghighi A. P. Anticipating an efficient relative humidity in a room under direct solar radiation and equipped by radiant cooling panel system. International Journal of Refrigeration. 2019, Vol. 98, P. 98–108. DOI 10.1016/j.ijrefrig.2018.10.018.

8. Sheikhzadeh G. A., Azemati A. A., Khorasanizadeh H. [et al.] The effect of mineral micro particle in coating on energy consumption reduction and thermal comfort in a room with a radiation cooling panel in different climates. Energy and Buildings. 2014, Vol. 82, P. 644–650. DOI 10.1016/j.enbuild.2014.07.043.

9. Zhang, H., Li N., Su L. Methodology research on solving non-steady state radiation heat transfer in the room with Ceiling Radiant Cooling Panels. International Journal of Refrigeration. 2015, Vol. 58, P. 110–120. DOI 10.1016/j.ijrefrig.2015.06.009.

10. Karadog R. New approach relevant to total heat transfer coefficient including the effect of radiation and convection at the ceiling in a cooled ceiling room. Applied Thermal Engineering. 2009, Vol. 29, P. 1561–1565. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2008.07.005.

© **М. В. Бодров, А. Е. Руин, А. А. Смыков, А. Д. Елизаров, 2026**

Получено: 17.03.2026 г.