

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель и задачи исследования, представлена научная новизна результатов исследования и их практическая значимость. Также были представлены положения, выносимые на защиту, общая характеристика и структура работы.

В первой главе было проведено исследование научно-технического состояния проблематики изучения лучистых систем отопления, а именно:

- используемых в практике закономерностей лучистого теплообмена;
- используемых классификаций систем и приборов лучистого отопления;
- способов анализа состояния человека и условий комфортности при инфракрасном отоплении;
- методик расчёта и проектирования лучистых систем отопления.

Во второй главе проанализированы основные методики моделирования теплового баланса помещений с лучистыми системами отопления, проанализированы их достоинства и недостатки.

В ходе анализа наиболее распространённых методик определения требуемой тепловой мощности лучистой системы отопления было выявлено, что существующие методики не позволяют с высокой достоверностью смоделировать тепловой и температурный режим в отапливаемом помещении, спроектировать оптимальную вентиляционную систему и оптимизировать расположение инфракрасных излучателей в помещении. Расчёт по существующим методикам не позволяет подобрать с высокой точностью количество и мощность инфракрасных излучателей.

Был проведён анализ ключевых отличительных особенностей формирования теплового режима в помещениях с лучистым и конвективным отоплением. В случае применения конвективного отопления под покрытием помещения формируется «тепловая подушка» из перегретого, относительной рабочей зоны, воздуха, и, соответственно, теплота распределяется не оптимальным образом в объёме обслуживаемого помещения. С применением лучистого отопления в помещении формируется более равномерный тепловой режим ввиду того, что направленное излучение нагревает поверхности нижней зоны помещения.

По итогам анализа была предложена уточнённая система уравнений, которая описывает тепловой баланс помещения с лучистой системой отопления:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^7 Q_{1-i}^n = 0; \quad (1) \\ \sum_{i=1}^5 Q_{2-i}^n + Q_{1-2}^n + Q_{2-6}^k + Q_{2-n}^{in} = 0; \quad (2) \\ \sum_{i=1}^5 Q_{3-i}^n + Q_{1-3}^n + Q_{3-7}^k + Q_{6-7}^m = 0; \quad (3) \\ \sum_{i=1}^3 Q_{4-i}^n + Q_{1-4}^n + Q_{5-7}^k + Q_{3-n}^{in} = 0; \quad (4) \\ \sum_{i=1}^3 Q_{5-i}^n + Q_{1-5}^n + Q_{5-6}^k + Q_{3-n}^{in} = 0; \quad (5) \\ Q_{1-6}^k + Q_{6-2}^k + Q_{6-5}^k + Q_{6-7}^n + Q_{6-7}^m = 0; \quad (6) \\ Q_{7-1}^n + Q_{7-n}^n + Q_{3-7}^k + Q_{4-7}^k + Q_{8-7}^k = 0; \quad (7) \\ \Delta P_{в.з-н.з} = sG_{в.з-н.з}^2; \quad (8) \\ t_R + At_{в.п} = B. \quad (9) \end{array} \right.$$

Индексы в уравнениях (1÷9): теплообменивающиеся поверхности 1 – ИИ; 2 – потолок; 3 – пол; 4 – облучаемые наружные ограждения; 5 – необлучаемые наружные ограждения; 6 – объем воздуха необлучаемой верхней зоны; 7 – объем воздуха облучаемой нижней зоны; 8 – оборудование; н – наружный воздух; в.з – верхняя зона; н.з – нижняя зона; способы теплообмена л – лучистый; к – конвективный; тп – теплопередача; и – инфильтрация; м – массообмен между зонами; $\Delta P_{в.з-н.з}$ – перепад давления в уравнении (8), Па, определяющий воздухообмен между зонами; s – характеристика сопротивления; $G_{в.з-н.з}$ – воздухообмен между зонами, м³/ч; t_R – радиационная температура помещения, °С; A , B – постоянные теплового комфорта; $t_{в.п}$ – температура воздуха рабочей зоны помещения, °С.

По уравнению (1) определяется поток излучения от отопительного прибора. Теплообмен на поверхностях пола, потолка, стен обеих зон описывается уравнениями (2), (3), (4), (5), которые учитывают взаимное облучение каждой отдельной поверхности помещения с остальными, включая ИИ. Тепловой баланс воздуха верхней и рабочей зон рассмотрен в уравнениях (6) и (7). Уравнение (8) дает величину воздухообмена между верхней и рабочей зонами. В качестве граничных условий при решении системы принято первое условие комфортности, представленное в уравнении (9).

С учётом принятых упрощений и допущений система уравнений (1÷9) запишется в развернутом виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_o = 0,125 \frac{\sum F_1}{f_3} Q_n^c \psi / 3600; \quad (10) \\ C_{в.з-3} \varphi_{3-2} (F_2 - \sum F_1) (\tau_3 - \tau_{в.з}) + (\alpha_2 F_2 + \alpha_5 F_5) (t_6 - \tau_{в.з}) - \\ - \left(\frac{F_2}{(\delta_2/\lambda_2 + 1/\alpha_n)} + \frac{F_5}{(\delta_5/\lambda_5 + 1/\alpha_n)} \right) (t_6 - t_n) = 0; \quad (11) \\ (1 - k_{в.п}) (1 - \mu) \psi Q_o + C_{3-4} \varphi_{3-4} F_3 (\tau_3 - \tau_4) - \\ - F_4 \alpha_{к4} (\tau_4 - t_{в.п}) - F_4 \frac{(\tau_4 - t_n)}{(\delta_4/\lambda_4 + 1/\alpha_n)} = 0; \quad (12) \\ Q_8 + F_4 \alpha_4 (\tau_4 - t_{в.п}) + F_3 \alpha_3 (\tau_3 - t_{в.п}) - \\ - G_{в.з-н.з} c_p (t_6 - t_{в.п}) - c_p G_n (t_{в.п} - t_8) + \psi Q_o = 0; \quad (13) \\ (1 - \psi) Q_o - (F_5 \alpha_{к5} + F_2 \alpha_{к2}) (t_6 - \tau_5) - c_p G_n (t_6 - t_{в.п}) = 0; \quad (14) \\ \psi Q_o - F_3 \alpha_{к3} (\tau_3 - t_{в.п}) - C_{в.з-3} \varphi_{3-2} (F_2 - \sum F_1) (\tau_3 - \tau_{в.з}) - \\ - C_{3-4} \varphi_{3-4} F_3 (\tau_3 - \tau_4) - F_3 \frac{(\tau_3 - t_n)}{(\delta_3/\lambda_3 + 1/\alpha_n)} = 0; \quad (15) \\ \psi Q_o = C_{1-3} \mu \sum F_1 (\tau_1 - \tau_3) + C_{1-4} (1 - \mu) \sum F_1 (\tau_1 - \tau_4); \quad (16) \\ \left[\varphi_{ч-2} \frac{\tau_1 \sum F_1 + \tau_{в.з} (F_2 - \sum F_1)}{F_2} + \varphi_{ч-4} \tau_4 + \varphi_{ч-3} \tau_3 - \tau_ч \right] + At_{в.п} = B. \quad (17) \end{array} \right.$$

В системе уравнений (10÷17) дополнительно: α_k – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·°C); $\alpha_{в}$, $\alpha_{н}$ – коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхностями ограждения Вт/(м²·°C); φ – коэффициент облучённости соответствующих ограждений; $\varphi_{ч-2}$, $\varphi_{ч-3}$, $\varphi_{ч-4}$ – коэффициенты облучённости с поверхности тела человека (животного) на соответствующее ограждение; C_{3-4} , $C_{в.3-3}$ – коэффициенты, равные $C_0 \varepsilon b$, Вт/(м²·°C); b – температурный коэффициент, К³; δ – условная толщина, м; λ – коэффициент теплопроводности Вт/(м·°C) наружного ограждения; Q_8 – тепловыделения от оборудования, Вт; ψ – лучистый коэффициент полезного действия излучателя; F_2 , F_3 , F_4 , F_5 – площади потолка (покрытия), пола и стен нижней и верхней зон, м²; ΣF_1 – суммарная площадь излучающих поверхностей излучателя, м²; $\tau_{ч}$ – температура тела человека или животного, °C; c_p – теплоёмкость воздуха, Дж/(кг·°C); $Q_{н}^c$ – низшая теплота сжигания газа, Дж/м³.

Физико-математическая модель температурного режима в помещении с лучистой системой отопления, которая описана в системе уравнений (10÷17), позволяет с высокой достоверностью моделировать температурный режим в производственных помещениях.

В третьей главе проведен ряд экспериментальных исследований, позволяющих описать теплотехнические характеристик водяных инфракрасных излучателей и теплового режима обогреваемых ими помещений.



Рисунок 1 – Общий вид и термограммы Лаборатории лучистого отопления



Рисунок 2 – Излучатель марки Helios 750



Рисунок 3 – Излучатель марки Flower 125

Для проведения комплекса исследований модели лучистой системы отопления на базе водяных инфракрасных излучателей в ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» был создан Учебно-

научно-исследовательский центр «Системы отопления с использованием низкотемпературных инфракрасных излучателей» (УНИЦ «СОНИИ»). Основой центра стала Лаборатория лучистого отопления (рисунок 1), оборудованная необходимой приборной базой, и созданная совместно с ООО «Флайг+Хоммель» (г. Заволжье, Нижегородская обл.) – единственным производителем излучающих профилей на территории России. Лаборатория лучистого отопления в своём составе имеет поверенную и сертифицированную приборную базу. Объектом исследований стали излучающие профили моделей Helios 750 и Flower 125 производства ООО «Флайг+Хоммель» (рисунки 2 и 3).

В результате проведения эксперимента № 1 были получены достоверные теплотехнические характеристики исследуемых отопительных приборов.

Для определения удельной мощности ВИИ при любом температурном напоре ΔT , необходимо определить показатели a и m для степенного уравнения:

$$q_{\text{изл}} = a \cdot \Delta T^m \quad (20)$$

Для построения зависимости необходимо определить показатели a и m для уравнения (20). Автором были использованы две методики: математическое моделирование линии тренда в программном комплексе MathCAD (рисунок 4) и построение линейной регрессии в логарифмическом масштабе.

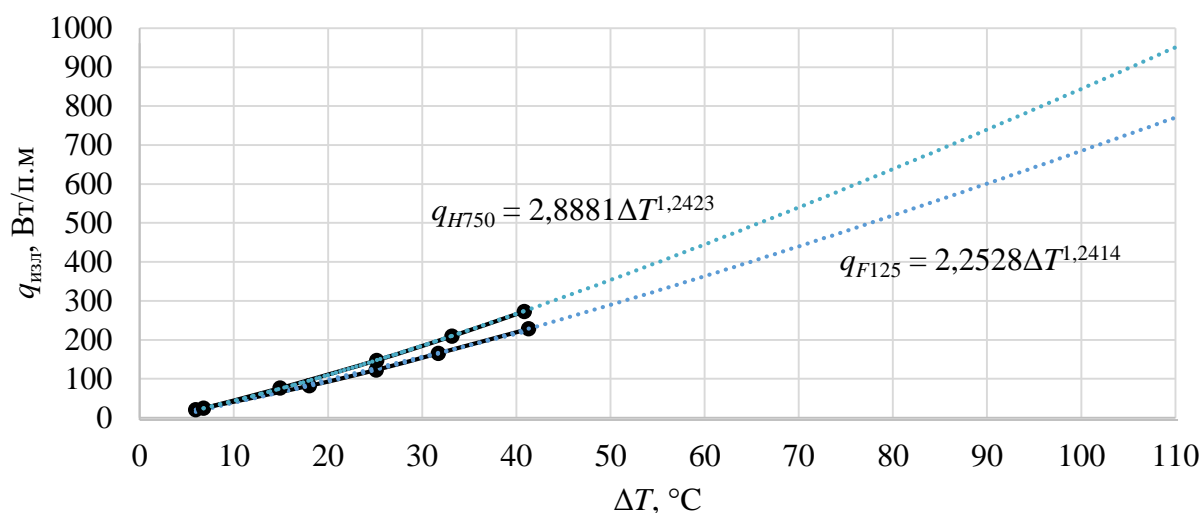


Рисунок 4 – Результаты моделирования степенной линии тренда в программном комплексе MathCAD для результатов испытания излучателей марок Helios 750 и Flower 125

Вследствие проведённых построений уравнение удельного теплового потока для исследуемых излучателей будет выглядеть следующим образом:

$$q_{\text{изл}}^{H750} = 2,8881 \cdot \Delta T^{1,2423}; \quad (21)$$

$$q_{\text{изл}}^{F125} = 2,2528 \cdot \Delta T^{1,2414} . \quad (22)$$

Таблица 1 – Удельная мощность исследуемых излучателей при фиксированных значениях ΔT

$\Delta T, ^\circ\text{C}$	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$q_{\text{изл}}^{H750}$, 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
$q_{\text{изл}}^{F125}$, 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

Следовательно, теперь мы можем составить таблицу для всего расчётного диапазона ΔT (таблица 1).

В ходе эксперимента № 2 были получены достоверные зависимости, характеризующих кривые изменения плотности лучистого теплового потока (эпюра лучистой теплоты). Для их построения была проведена математическая обработка результатов эксперимента. В результате обработки результатов в программном комплексе MathCAD были получены полиномиальные уравнения четвёртой степени для кривых плотности лучистого теплового потока при разных параметрах излучателей (рисунок 5).

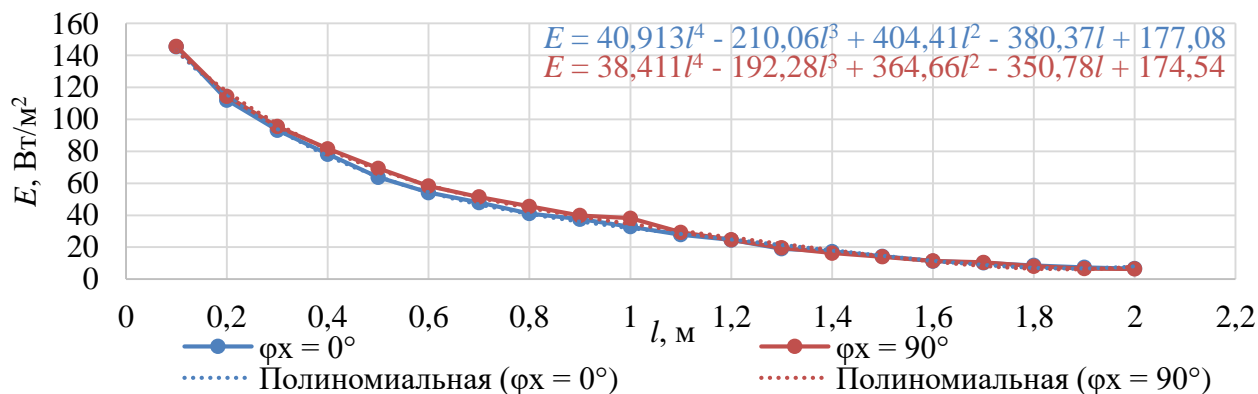


Рисунок 5 – Кривые плотности лучистого теплового потока для излучателя Helios 750 ($T_1 = 90^\circ\text{C}$; $\tau_{\text{изл}} = 88,7^\circ\text{C}$)

По итогам проведения лабораторных и натурных исследований входящих в эксперимент № 3 автором был сделан вывод, что применение систем лучистого отопления действительно позволяет добиться более равномерного теплового режима в крупнообъёмном помещении. Результаты термографического обследования, проведённого в ходе эксперимента приведены на рисунке 6.

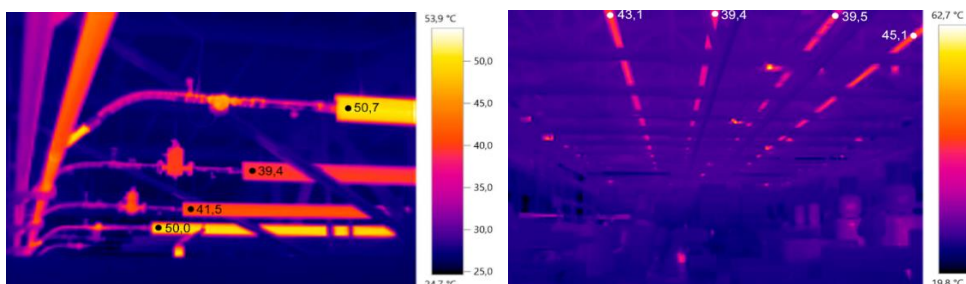


Рисунок 6 – Результат термографического обследования

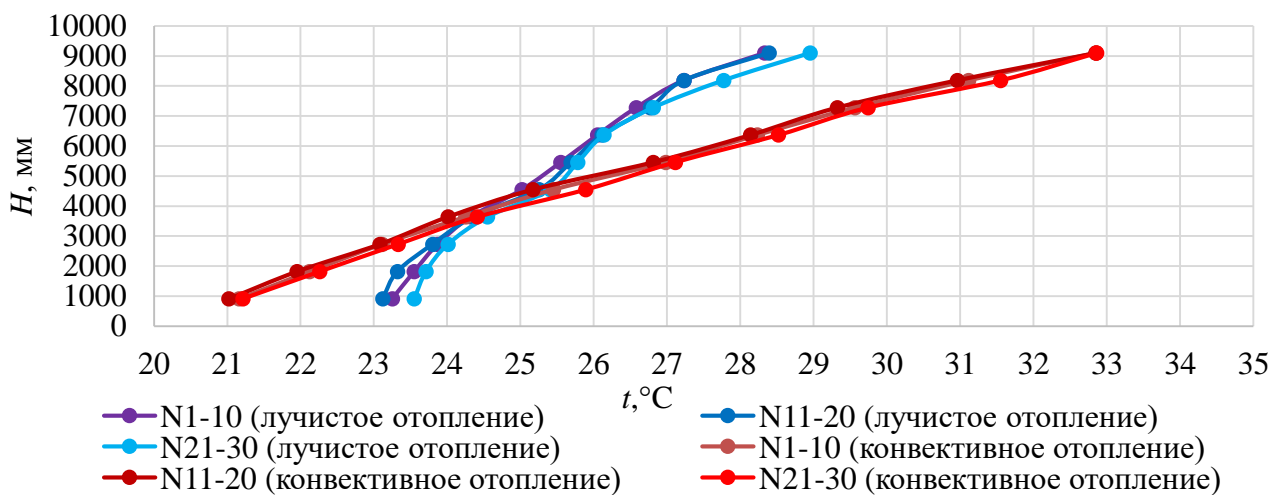


Рисунок 7 – Распределение температуры воздуха в помещении цеха металлообработки

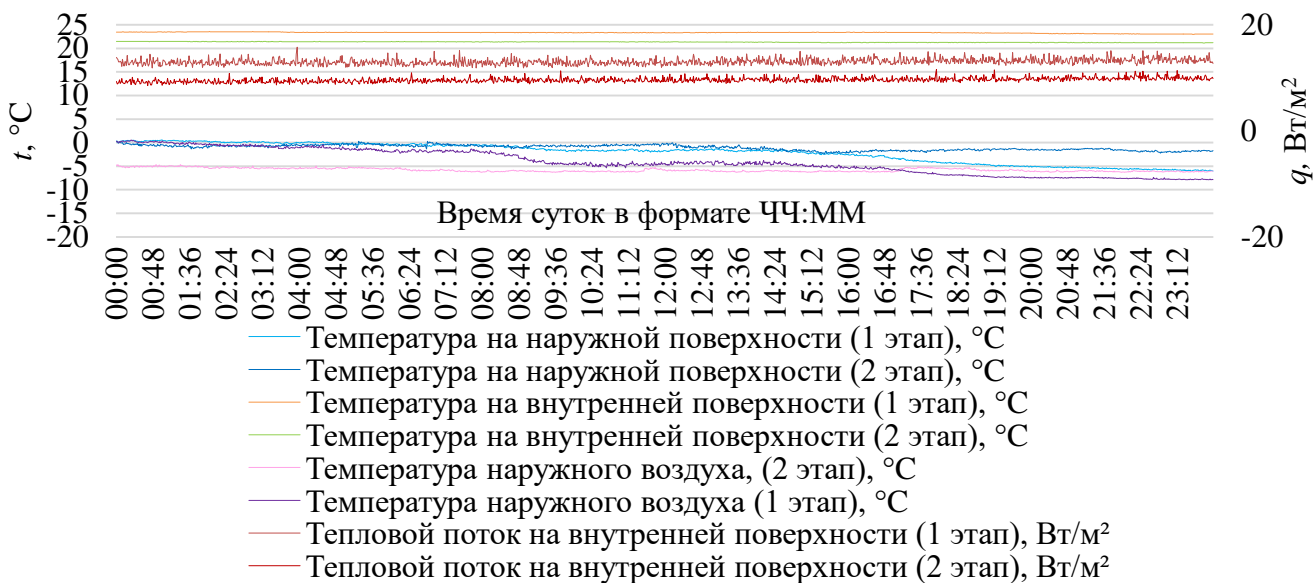


Рисунок 8 – Показания датчиков в ходе 1 (лучистое отопление) и 2 (конвективное отопление) этапов эксперимента

В ходе проведения эксперимента № 4 были получены данные, позволяющие говорить о том, что использование лучистого отопления приводит к более равномерному температурному режиму в отапливаемом помещении, и меньшему перегреву покрытия помещения, чем при использовании конвективных систем отопления (рисунок 7). Целью проведения эксперимента № 5 стало изучение теплового режима наружных ограждающих конструкций в помещениях с системами лучистого отопления (рисунок 8).

Проведённые эксперименты позволяют сделать вывод о том, что применение лучистых систем отопления позволяет повысить энергоэффективность обслуживаемого помещения за счёт: более равномерного температурного режима в помещении; снижения трансмиссионных теплопотерь; уменьшения общей тепловой инерции системы отопления.

В четвертой главе автором предложены конкретные рекомендации по проектированию системы лучистого отопления.

Для оценки экономической эффективности внедрения лучистых систем отопления были применены следующие методики оценки: методика определения экономически-обоснованного утепления контура здания на основе расчёта срока окупаемости капитальных затрат на обустройство утепления теплового контура здания; методика определения совокупных дисконтированных капитальных и эксплуатационных затрат за определённый срок; методика Госстроя РФ определения годовых потоков теплоты, которая широко применяется ресурсоснабжающими организациями.

Для апробации результатов диссертационного исследования послужило вновь возведённое здание склада сухого хранения с административно-бытовой частью ООО «Флайт+Хоммель» в г. Заволжье (рисунок 9), в котором создание системы лучистого отопления было проведено с применением предложенной методики проектирования лучистой системы отопления. Здание имеет отапливаемый объём $V_{от} = 36288 \text{ м}^3$; площадь стен $A_{ф\text{ стен}} = 2484 \text{ м}^2$; площадь покрытия $A_{ф\text{ покр}} = 4032 \text{ м}^2$; площадь пола $A_{ф\text{ пол}} = 4032 \text{ м}^2$; площадь светопрозрачных ограждающих конструкций $A_{ф\text{ ветопрозр}} = 556 \text{ м}^2$.

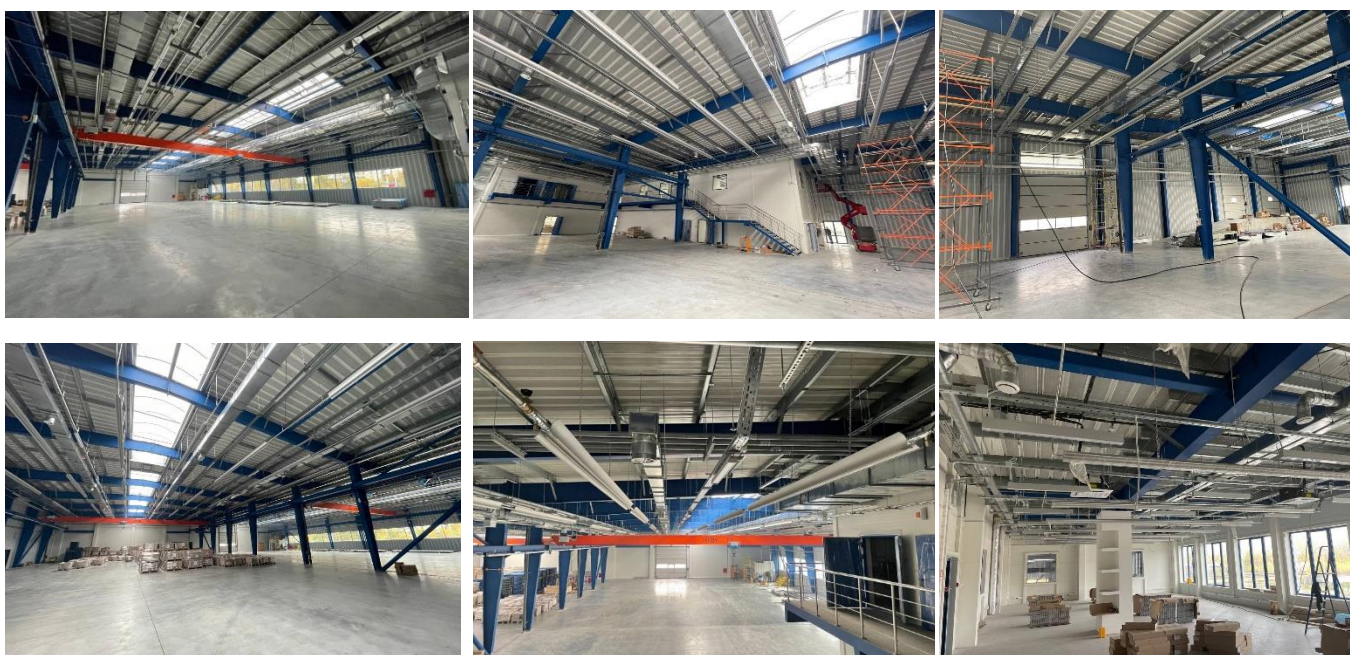


Рисунок 9 – Общий вид вновь возведённого здания склада сухого хранения с административно-бытовой частью ООО «Флайт+Хоммель» в г. Заволжье

В ходе расчёта экономически-обоснованного утепления контура здания на основе расчёта срока окупаемости капитальных затрат на обустройство утепления теплового контура здания была разработана блок-схема (рисунок 10). Результатом расчёта стал график срока окупаемости утепления контура здания для города

Заволжья и других городов России, а также график зависимости экономии денежных средств на оплату тепловой энергии от толщины утепляющего слоя.

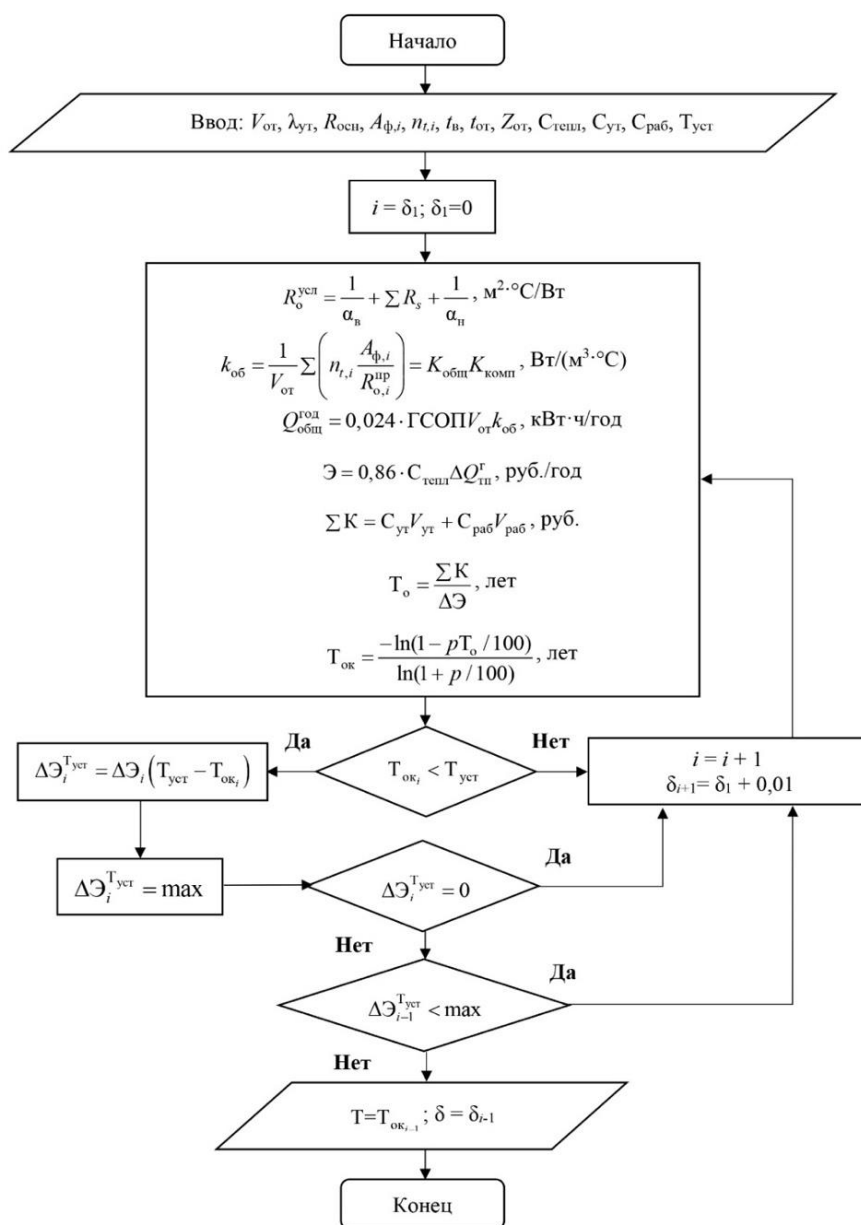


Рисунок 10 – Блок схема расчёта экономически-обоснованного утепления контура здания

Согласно методике определения совокупных дисконтированных капитальных и эксплуатационных затрат общий эффект от применения лучистой системы лучистого отопления составил 11,32 %, или 595 руб./м² (таблица 2).

Таблица 2 – Удельная мощность исследуемых излучателей при фиксированных значениях ΔT

Тип системы	СДЗ капитальные, руб.	СДЗ эксплуатационные, руб.	ΣСДЗ, руб.
Конвективное отопление	9775169	11420130	21195300
Лучистое отопление	8974513	9822240	18796753
		Разница, руб.	2398547
		Разница, %	11,32

Анализ годового нормативного потребления тепловой энергии показал, что при использовании лучистого отопления можно добиться величины энергосбережения в

22,13 %, при использовании дежурного режима в нерабочее время эффект от применения системы лучистого отопления достигнет 27,19 %, а максимальная разница между постоянным режимом работы конвективного отопления и режимом работы лучистого отопления с использованием перехода в дежурный режим составит 37,37 % (таблица 3).

Таблица 3 – Расчёт нормативного потребления тепловой энергии на нужды отопления в отопительный период

Наименование	Примеч.	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	22,13
	Лучистое отопление	236,49	171,83	151,35	76,29	66,22	145,45	163,96	1011,59	
$Q_{o.p.p}, \text{Гкал}$	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	
$Q_{o.d.p}, \text{Гкал}$	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	
$Q_{o.p.p}, \text{Гкал}$	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	
$Q_{o.смеш}, \text{Гкал}$	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. Городец (Нижегородская обл.); $z_{р.р}$ – продолжительность в рабочего режима, ч; $z_{д.р}$ – продолжительность дежурного режима, ч; $z_{п.р}$ – продолжительность переходного режима, ч; $Q_{o.p.p}$ – потребление тепловой энергии в рабочем режиме, Гкал; $Q_{o.d.p}$ – потребление тепловой энергии в дежурном режиме, Гкал; $Q_{o.p.p}$ – потребление тепловой энергии в переходном режиме, Гкал; $Q_{o.смеш}$ – потребление тепловой энергии в смешанном режиме, Гкал

На основании проведенного сравнительного анализа по трем различным методикам была доказана экономическая эффективность внедрения лучистых систем отопления.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования: исследование влияния строительных конструкций с различными коэффициентами серости на формируемый тепловой и температурный режимы в отапливаемом помещении.