

Сравнительный анализ воздушного и лучистого отопления помещений большого объема

Существуют два альтернативных способа отопления помещений большого объема, к которым, прежде всего, относятся производственные сооружения различного назначения, а также спортивные комплексы, выставочные залы, склады и т.п. Таковыми являются воздушное и лучистое отопление. В последние годы, особенно в зарубежной литературе, имели место многочисленные дискуссии о преимуществах и недостатках указанных способов. В связи с тем, что на текущий момент в России отсутствует четкое мнение по данному вопросу среди потребителей и поставщиков отопительного и вентиляционного оборудования, настоящим предпринята попытка сопоставить рассматриваемые способы с технической и экономической точек зрения.

Автор Е.П. ВИШНЕВСКИЙ, к.т.н., Р.Б. ЖУЙКОВ, инженер, компания UNITED ELEMENTS

Прежде всего, лучистое отопление следует различать, исходя из используемого типа излучателей, классифицируемых следующим образом:

- **темные излучатели** в соответствии с DIN 3372, часть 6 [1], без открытого пламени с температурой поверхности, не превышающей 450°C;
- **светлые излучатели** в соответствии с DIN 3372, часть 1 [2], с температурой поверхности до 900°C.

Среди многочисленных типов оборудования, используемых для воздушного отопления, наибольший интерес представляют децентрализованные агрегаты с верхней раздачей воздуха свободными струями с полым ядром и регулируемым углом закручивания [3–9]. Что касается лучистого отопления, из физических соображений только светлые излучатели в полной мере реализуют лучистый теплообмен, интенсивность которого в соответствии с законом Стефана-Больцмана пропорциональна четвертой степени разности температур обменивающихся теплом поверхностей.

В случае темных излучателей, использующих длину волны излучения порядка 10 м, наряду с лучистой составляющей существенным является конвективный теплообмен, что, с одной стороны, позволяет в определенной мере избежать недостатков, характерных для лучистого отопления, а, с другой стороны, приводит к ухудшению условий обогрева, свойственных размещению нагревателей конвективного типа под потолком.

1. Остановившись на лучистом отоплении с использованием светлых излучателей, следует отметить, что созданию высоких температур сопутствует выгорание кислорода, а также образование вредных веществ за счет пригорания пыли.

В связи с этим возникает потребность в определенном количестве свежего воздуха. Согласно рекомендациям DVGW G 638, часть 1 [10], на каждый кВт мощности, развиваемой светлыми излучателями, необходимо гарантированное снабжение не менее 30 м³/ч свежего воздуха.

Таким образом, возникающий эффект «антивентиляции» приводит к тому, что их использование в достаточно герметичных строительных объемах проблематично.

Очевидным является следующее отношение площади ограждающих конструкций к объему помещения:

$$\frac{A}{V} = \frac{2WL + 2HW + 2HL}{WLH} = \frac{2}{H} + \frac{2}{L} + \frac{2}{W}, \quad (1)$$

где: W — ширина, L — длина, H — высота помещения. В результате несложных преобразований имеем:

$$\frac{A}{V} = \frac{2(1+\xi)}{\sqrt{\xi}A_f} + \frac{2}{H}, \quad (2)$$

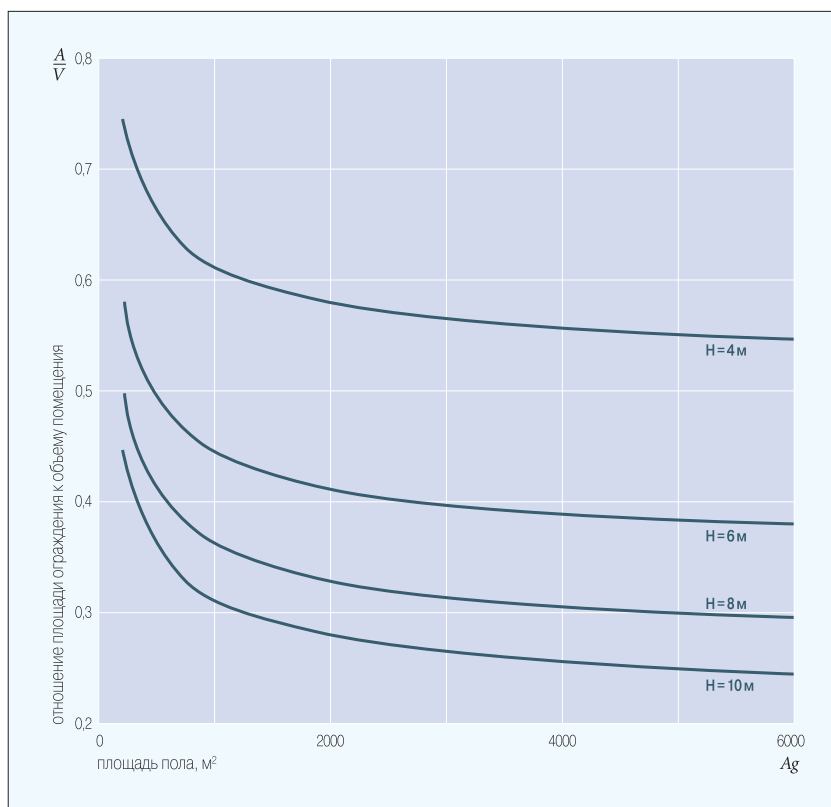
где: $\xi = L/W$, $A_f = LW$.

При высоте помещения 10 м, $\xi = 10$, $A_f \approx 1000 \text{ м}^2$, имеем $A/V \approx 0,3$. Полагая потери тепла через ограждающие конструкции равными 0,1 кВт/м², получаем, что применение светлых излучате-

лей допустимо при естественной аэрации, составляющей не менее $0,1 \cdot 0,3 \cdot 30 = 0,9 \text{ л/ч}$. Указанное соответствует условиям негерметичных помещений, открытых и полукрытых площадок.

2. Независимо от типа излучателя перенос тепла за счет лучистой составляющей происходит опосредованным образом. Под действием относительно высокой температуры излучателя в первую очередь осуществляется разогрев ограждающих поверхностей, которые, в свою очередь, служат вторичным источником тепловыделений. В этом смысле показательным является анализ приведенной выше формулы (2), характеризующей взаимосвязь между площадью пола A_g , м², и отношением площади ограждающих конструкций к объему помещения A/V . На рис. 1 указанная зависимость представлена графически для различных значений высоты помещения H .

Детальные исследования [11], в т.ч. путем постановки крупномасштабных экспериментов в натуре, показывают, что использование светлых излучателей является эффективным при высоте помещения не более 10 м, а темных излучателей — при высоте помещения не более 5 м. При этом следует заметить, что современные вентиляционные агрегаты с верхней раздачей воздуха обеспечивают формирование свободных аэродинамических струй, имеющих дальностью до 18–20 м. Обращаясь к графику, представленному на рис. 1, следует заметить, что в рассматриваем-



■ Рис. 1. Зависимость A/V от A_g при $H = 10; 8; 6$ и 4 м

мом диапазоне высот помещений площадь A , а, следовательно, и роль ограждающих конструкций в качестве вторичного источника тепловыделений по сравнению с общим объемом помещения V сохраняется повышенной только при значениях площади пола A_g , не превышающей 2000–3000 м². Таким образом, становятся очевидными преимущественные области использования лучистого и воздушного отопления, из которых последнее является предпочтительным для помещений большого объема, имеющих площадь не менее 2000 м² и высоту потолков не менее 10 м.

3. Одним из преимуществ лучистого отопления является возможность поддержания более низких температур воздуха внутри помещения при создании аналогичных условий тепловых ощущений, что и при использовании воздушного отопления. Указанное обстоятельство рассматривается как фактор энергосбережения, поскольку при этом несколько снижается количество тепла, потребного для подогрева приточного воздуха. Действительно, лучистое отопление характеризуется следующими основными показателями:

□ Средняя радиационная температура $\bar{t}_p$, равная температуре поверхности аб-

солютно черного тела, с которым происходил бы лучистый теплообмен, эквивалентный имеющему место в реальной обстановке;

□ Температура воздуха внутри помещения t_a ;

□ Оперативная температура t_0 , равная температуре поверхности абсолютно черного тела, с которым происходил бы в сумме лучистый и конвективный теплообмен, эквивалентный имеющим место в реальной обстановке;

□ Эффективный лучистый поток ERF , воздействующий на человека.

При известных значениях коэффициентов лучистого h_p и конвективного h_c теплообмена соотношения между перечисленными выше основными показателями определяются:

$$ERF = h_p(\bar{t}_p - t_a), \quad (3)$$

$$ERF = (h_p + h_c)(t_0 - t_a), \quad (4)$$

$$\bar{t}_p = t_a + \frac{ERF}{h_p}, \quad t_0 = t_a + \frac{ERF}{h_p + h_c} \quad (5-6)$$

$$\bar{t}_p = t_a + \frac{h_p + h_c}{h_p}(t_0 - t_a), \quad (7)$$

$$t_0 = t_a + \frac{h_p}{h_p + h_c}(\bar{t}_p - t_a). \quad (8)$$

Из приведенных формул очевидным является с увеличением радиационного фактора рост температуры поверхности ограждающих конструкций, что обуславливает потери тепла за счет их теплопроводности. В результате выигрыш энергии, расходуемой на подогрев приточного воздуха, оказывается связанным с повышенными кондуктивными теплопотерями. Количественно энергетический баланс определяется значениями h_p и h_c , выражаемыми следующим образом

$$h_p = 4 f_{эфф} \sigma \left(\frac{\bar{t}_p + t_a}{2} + T \right)^3, \quad (9)$$

где: $f_{эфф}$ — отношение поверхности тела человека, м², подверженной радиационному воздействию, к общей поверхности DuBois:

$$0,202 W^{0,425} H^{0,725},$$

где W — вес, кг; H — рост, м, $f_{эфф} = 0,71$; σ — постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); T — абсолютная температура, $T = 273$.

$$h_c = C_1 \nu^{0,5}, \quad (10)$$

где: ν — подвижность воздуха, м/с; C_1 — константа, $C_1 = 0,107$. Отсюда, роль радиационного фактора существенным образом зависит от подвижности воздуха в помещении и типа излучателя, что представлено на рис. 2.

4. Эффективность использования тепловой энергии внутри помещения зависит от формируемого по вертикали градиента температур. Обычно за счет естественной конвекции указанный градиент составляет порядка 1°C/м, что при высоте помещения $H = 10$ м означает перегрев скапливающегося под потолком воздуха на 10°C по отношению к рабочей зоне. Воздушное отопление с использованием вертикально направленных вниз свободных струй позволяет снизить нежелательную температурную стратификацию вплоть до значений градиента порядка 0,1°C/м. Это способствует не только более рациональному распределению тепла внутри помещения, но и снижает тепловые потери через кровлю, которая, как правило, обладает большей теплопроводностью в сравнении с другими ограждающими конструкциями. При использовании лучистого отопления, особенно с темными излучателями, имеет место обратная картина. Расположенные под потолком источники тепла, конвективная составляющая которых, как показано

выше, доходит до 30%, непреднамеренно увеличивают вертикальный градиент температуры по сравнению с естественным. В результате практически наблюдаемый перегрев воздуха в подпотолочном пространстве может достигать нескольких десятков градусов Цельсия с вытекающими отсюда нежелательными последствиями с энергетической точки зрения. Согласно теоретическим оценкам КПД теплового излучателя с замкнутой нагревательной системой составляет около 88%. У децентрализованных воздушонагревателей с верхней раздачей воздуха коэффициент полезного действия достигает 92–94%. Проведенные в Германии эксперименты [11] показали, что в цехе металлоконструкций с высотой потолков 12 м, который вначале был оснащен системой лучистого отопления, а затем переоборудован с использованием децентрализованных вентиляционных агрегатов воздушного отопления, температура в рабочей зоне изменилась с 11 до 11,5°C, в то время как температура воздуха под потолком снизилась с 28 до 18°C. Дневной расход топлива при этом сократился с 24,8 до 11,7 м³. В другом примере технико-экономическая оценка показала, что замена лучистого на воздушное отопление машиностроительного цеха объемом 22 тыс. м³ имела своим результатом сокращение годовых расходов на энергоносители с 49 тыс. до 17 тыс. немецких марок.

5. Считается, что лучистое отопление характеризуется быстрым разогревом помещения. Это действительно так в сравнении с традиционной системой отопления конвекторного типа. В сравнении же с воздушным отоплением, использующим децентрализованные вентиляционные агрегаты с верхней раздачей воздуха, лучистое отопление оказывается более инерционным. Дело в том, что воздушное отопление реализует тепловую энергию непосредственно путем подачи в рабочую зону воздуха, подогретого необходимым образом. Разогрев же ограждающих конструкций является вторичным, температура поверхности которых постепенно приближается к температуре возду-

ха, оставаясь несколько ниже в зависимости от теплопроводности используемых строительных материалов. При использовании лучистого отопления ситуация является прямо противоположной. В первую очередь происходит разогрев ограждающих конструкций под действием лучистого тепла, и лишь затем разогревается воздух, температура которого всегда остается ниже температуры ограждающих конструкций. Лимитирующим фактором при этом является не только теплопроводность используемых строительных материалов, но и другие их теплотехнические свойства, объединяемые понятием температурная проводимость:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \text{ м}^2/\text{с}. \quad (11)$$

где: λ — теплопроводность, Дж/(м·с·К), c — теплоемкость, Дж/(кг·К), ρ — плотность, кг/м³.

Согласно оценкам, проведенным в работе [12], исходя из значений температурной проводимости равных $0,317 \cdot 10^{-6}$ (кирпич), $0,362 \cdot 10^{-6}$ (асфальт), $0,568 \cdot 10^{-6}$ (бетон), тепловая инерция лучистого отопления в реальных условиях составляет порядка 1000 с.

Показатели инерционности отопительной системы особенно важны в двух аспектах:

- с точки зрения поддержания заданных температурных режимов при варьируемых условиях работы (открывающиеся ворота, переменные технологические процессы, транспортные операции);
- при переходе из дежурного в рабочий режим, например, в начале смены после ночного снижения температуры до минимально допустимого уровня.

При этом следует иметь в виду, что лучистое отопление регулируется, как правило, по принципу включения/выключения, в то время как воздушное отопление поддается пропорциональному регулированию. Регулирование путем отключения и включения лучистых обогревателей (свет — тепло, темнота — холод) целиком либо группами приводит к невозможности равномерного поддержания заданных температурных режимов как в пространстве, так и во времени. Групповое регулирование (отключение

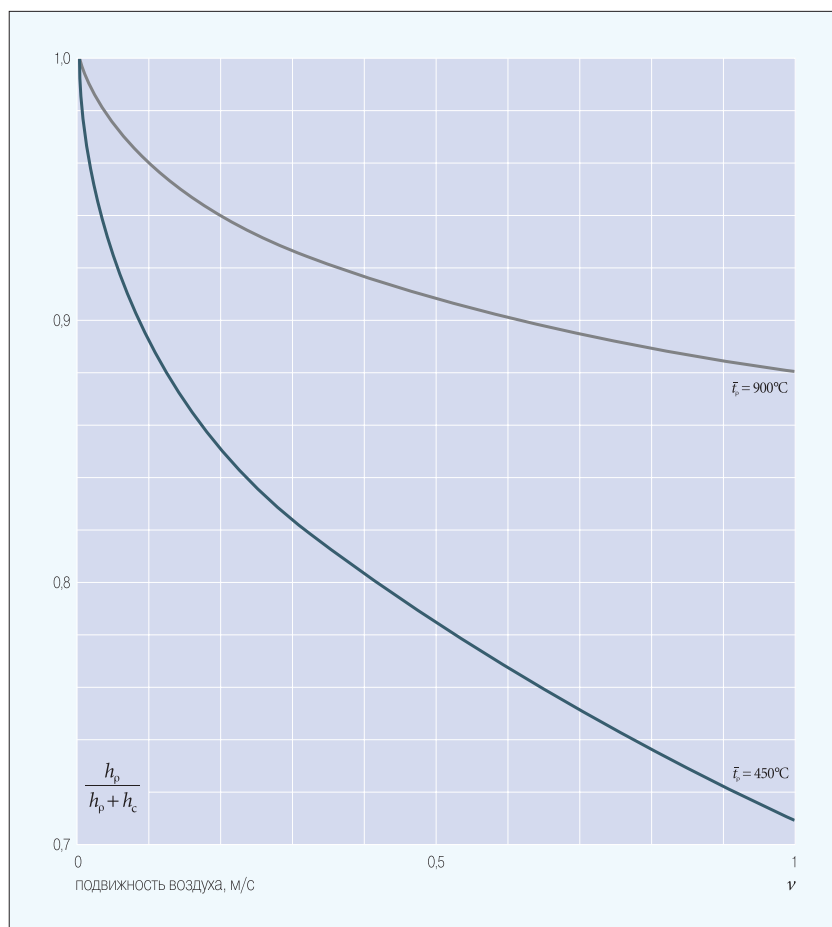


Рис. 2. Роль радиационного фактора в работе светлых ($t_p = 900^\circ\text{C}$) и темных ($t_p = 450^\circ\text{C}$) излучателей

каждого второго или третьего излучателя) приводит к неоднородности распределения температур по площади помещения. При этом имеет место также нестабильность температурных режимов во времени, которая является особо выраженной в случае регулирования путем отключения и включения системы лучистого отопления целиком.

6. Неоднородность формируемых температурных полей является характерной особенностью лучистого отопления. Помимо ограждающих конструкций существенную роль играет внутренняя планировка помещений, а также размещаемое в них оборудование. В результате создаются зоны затенения, условия прогрева которых резко отличаются от зон прямого воздействия излучателей. Недостатки проектирования лучистого отопления за счет этого могут приводить к наличию температурных контрастов, что создает угрозу простудных заболеваний. В этом отношении воздушное отопление, работающее по принципу «затопления» рабочей зоны нагретым воздухом, создает

«мягкое» тепло, лишенное резких температурных контрастов.

Выводы

Отдавая должное лучистым излучателям как наиболее простому и в ряде случаев дешевому средству отопления, следует признать ряд сопутствующих их применению недостатков. Светлые излучатели допустимы к использованию в условиях негерметичных помещений, открытых и полуоткрытых площадок. Применение темных излучателей рационально при отоплении помещений сравнительно небольшой площади и объема, не требующих создания повышенных комфортных условий. В остальных случаях современные системы воздушного отопления, использующие децентрализованные вентиляционные агрегаты с верхней раздачей воздуха, обладают неоспоримыми преимуществами. Экономическая целесообразность использования подобных систем должна обосновываться сравнительным анализом не только капитальных, но и эксплуатационных затрат. ■

1. DIN 3372, Teil 6 «Heizstrahler — Dunkelstrahler mit Brenner mit Geblase» (1988–12).
2. DIN 3372, Teil 1 «Heizstrahler — Dunkelstrahler mit Brenner ohne Geblase» — Gluhstrahler (1988–01).
3. Вишневский Е.П. Реализация энергосберегающих технологий обработки воздуха на базе рециркуляционно-рекуперационных агрегатов моноблочного типа производства фирмы HOVAL. ABOK, № 6/1998.
4. Как извлечь прибыль из воздуха. Информационно-аналитический журнал «Мир Перспектив», № 1/1999.
5. Вишневский Е.П. Опыт вентиляции объектов промышленности и социально-бытового назначения с использованием децентрализованных агрегатов производства фирмы HOVAL. ABOK, № 5/1999.
6. Вишневский Е.П. Вентиляция крупных промышленных сооружений с использованием децентрализованных агрегатов моноблочного типа. Огнеупоры и техническая керамика, № 5/2000.
7. Баландина Л.Я., Вишневский Е.П. Вентиляция крупных промышленных и общественных сооружений с использованием закрученных струй. Труды VII-го съезда ABOK, 2000.
8. Vishnevsky E.P. Numerical Estimation and Comparison of Main Energy Efficient Design Strategies for Mechanical Ventilation Systems. The Journal of the International Society of the Built Environment «Indoor + Built Environments», 2000, vol. 9, № 2.
9. Вишневский Е.П. Энергоэффективные методы воздушного отопления и вентиляции больших строительных объемов. Сборник материалов конференции «Проблемы энергосбережения и пути их решения в строительстве и жилищно-коммунальном комплексе в соответствии с требованиями нормативов», Санкт-Петербург, 7–8 декабря, 2000.
10. DVGW G 638/1 «Heizungsanlagen mit Hellstrahlern» (1991-03).
11. Hittmann K.H. Hallen Erwarmen. Warmluft kontra Strahlung zum wirkungsvollen Beheizen von sehr grossen Raumen, Technical report, 2000.
12. Schmidt P. Zur direkten Beheizung gro. erer Hallen. GASWARME International, 1999, vol. 13, № 48.