



**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО
ЭЛЕКТРООБОГРЕВА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ.
ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА И ОЦЕНКА ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ**

Г.С. Сухов¹, Г.В. Лепеш²

*Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики (СПбГУСЭ), 191015,
191015, Санкт-Петербург, ул. Кавалергардская, 7, лит. А.*

G.S. Sukhov, G.V. Lepesh

Предложено решение задачи экономного обогрева производственных помещений промышленных предприятий путем дифференцированного обогрева рабочего места инфракрасными электронагревательными приборами. Для обоснования эффективности рассчитан регламент работы системы дифференцированного электрообогрева на один из месяцев отопительного периода (ноябрь, 2011г.) и определены месячный расход энергии и стоимость обогрева.

Ключевые слова: электрообогрев; температурный режим; рабочее место; радиационный поток; динамический баланс; охлаждение.

**THEORETICAL BASES OF TECHNOLOGY OF DIFFERENTIAL HEATING OF
PRODUCTION PREMISES. ORGANIZATION OF THE PROCESS AND THE
ASSESSMENT OF ITS EFFECTIVENESS**

G.S. Sukhov, G.V. Lepesh

*St.-Petersburg state university of service and economy (SPbSUSE),
191015, St.-Petersburg, street Kavalergardsky, 7 A.*

We suggest a solution of the tasks of economical heating of production premises of industrial enterprises by differential heating of the workplace IR electroheating devices. For a substantiation of efficiency is calculated regulations of work of systems of differential heating on one of the months of the heating season (November, 2011) and determined the monthly energy consumption and the cost of heating.

Keywords: electric heating; temperature; place of work; the radiation flux; dynamic balance; cooling.

Проблема энергообеспечения особенно в экономически развитых странах весьма актуальна. Одной из ветвей этой проблемы является задача экономного обогрева производственных помещений промышленных предприятий. Особенно актуальной эта проблема является в северных странах, в том числе и в России, где на большей части территории зимний отопительный период отличается большой продолжительностью и весьма низкими температурами.

Здесь в основе обогрева жилого фонда и промышленных предприятий сохраняется введенная ещё в середине 30-х годов прошлого столетия т.н. теплофикационная система пароводяного отопления, основанная на реализации тепловой энергии отработанного в турбинах ТЭЦ влажного водяного пара. Хотя традиционно считается, что теплофикация – удачное решение проблемы обогрева жилых и производственных помещений, однако в действительности

сти ей присущи серьезные недостатки. Это и крупные потери при транспортировке тепловой энергии, и огромное количество подземных трубопроводов, требующих постоянного ухода и ремонта, и использование сложных систем для перекачивания теплоносителя на большие расстояния, а также затратное содержание технически оснащённых ремонтных служб, сложное проектирование и строительство новых трубопроводов и т.д. . Даже этот далеко не полный перечень перечисленных фактов показывает, что в действительности т.н. «даровая» тепловая энергия обходится государству очень дорого.

В развитых европейских и североамериканских странах (например, в Германии, США и Канаде) уже давно осуществлён переход на иные системы отопления в большинстве случаев в той, или иной форме, связанные с непосредственным использованием электро-

энергии. В последнее время появился интерес к применению обогрева жилых и производственных помещений инфракрасными электронагревательными приборами, диапазон излучения которых гармонично сочетается с природой человеческого организма.

Наиболее привлекательно выглядят электронагреватели, работающие в ближней и средней зонах инфракрасного спектра, в теплоотдаче которых преобладает радиационная составляющая [2]. Такие приборы способны к передаче направленным излучением большого количества энергии. Это делает возможным реализацию дифференцированного (избирательного) обогрева производственного помещения – интенсивного в той его части, где сосредоточен персонал, техника и производственный процесс, т.е. рабочие места (температура 18 – 20 °С) и минимально допустимого в остальной, нерабочей части помещения (температура 5 – 7 °С). Такой подход, принципиально отличающийся от объёмного (однородного) обогрева, свойственного радиаторам пароводяного отопления, даёт реальную возможность существенно сократить энергозатраты на обогрев производственных помещений и тем самым создать серьёзную альтернативу теплофикационной системе отопления.

Очевидно, что практическая реализация этого по существу инновационного метода требует детальной разработки элементов соответствующей технологии. Она достаточно сложна и включает в себя ряд взаимосвязанных задач, главной среди которых является расчёт теплового режима объёма рабочего места (далее ОРМ). Стабильная повышенная температура оборудования ОРМ обеспечивается балансом поступления направленного греющего радиационного потока Q_r от лучевого электронагревателя и потока теплоотдачи оборудования Q_t в окружающее нерабочее пространство с пониженной температурой, т.е.

$$Q_r = Q_t. \quad (1)$$

Вычисление составляющих уравнения (1) основано на использовании основных законов теории радиационного теплообмена с одной стороны [3] и теории теплового подобия с другой [4]. При этом следует принимать во внимание конкретные заданные условия:

- габариты рабочего места и параметры размещённого в нём оборудования;
- конструкцию и мощность радиационного электронагревателя;
- температурный режим ОРМ и нерабочей части помещения.

При соблюдении этих условий открывается возможность определения мощности тепловых потерь ОРМ Q_t , а также – мощности

обогревающего ОРМ радиационного потока, зависящего от дистанции h обогрева $Q_r=f(h)$.

Выбирая согласно условия (1) необходимое значение Q_r тем самым определяем требуемую дистанцию обогрева h .

Для конкретного вычисления энергетических затрат на дифференциальный электрообогрев всего производственного помещения в расчётную систему введены следующие конкретные исходные данные:

- внутренние габариты производственного помещения (м) 25·20·10, объём $V=5000 \text{ м}^3$;
- наружный объём здания, определяемый согласно существующим СНиП $V_H=7100 \text{ м}^3$;
- габариты рабочего места (м) $3 \times 2 \times 1,6$, его объём $V_p=9,6 \text{ м}^3$;
- количество рабочих мест в помещении $N=10$;
- содержание рабочего места: токарно-винторезный станок ГН-1640, габариты (м) $2,46 \times 1,01 \times 1,22$, масса 2120 кг; шкаф металлический, габариты (м) $1,5 \times 0,4 \times 0,8$;
- карбоновый электронагреватель: тип TOP-1, номинальная мощность 900 Вт, мощность излучения 690 Вт, мощность конвективной теплоотдачи 210 Вт [2];
- температурный режим производственного помещения: воздух в нерабочем пространстве $t_1=5^\circ\text{C}$; твердофазное оборудование в ОРМ $t_2=18^\circ\text{C}$.

В результате расчётов, основных на пересчитанных условиях, получены следующие результаты.

Для поддержания в пределах одного ОРМ стабильной температуры $t_2=18^\circ\text{C}$ мощность греющего потока излучения должна составлять $Q_r=429 \text{ Вт}$. Она обеспечивается двумя электронагревателями TOP-1, работающими в режиме симметричного обогрева ОРМ на номинальной мощности 900 Вт, с дистанции $h=1,8 \text{ м}$. [5]. Таким образом для обогрева 10 рабочих мест затрачивается мощность 18 кВт.

Очевидно, что вся эта мощность большая, чем необходимо для поддержания установленной температуры оборудования на всех 10 рабочих местах (а это всего 4,29 кВт) не пропадает бесследно, а в конечном счёте полностью реализуется для обогрева воздуха в нерабочем пространстве производственного помещения (см. рис.1).

Чтобы определить достаточность мощности 18 кВт для поддержания температуры $t_1=5^\circ\text{C}$ проведём анализ с использованием известного в строительной теплотехнике уравнения теплопотребления [6]. Адаптированное к решению данного вопроса оно принимает вид:

$$q=V_H q_0 (t_1 - t_{cp.0})/3600 \text{ (кВт)}, \quad (2)$$

где: q – мощность, необходимая для нагрева воздуха внутри производственного помещения до температуры t_1 ; $t_{ср.0}$ – усреднённая наружная температура отопительного периода, для Санкт-Петербурга и области $t_{ср.0} = -2,2$ °C; q_0 – удельная отопительная характеристика здания, при заданном V_H величина $q_0 = 1,47$ кДж/(м³·час °C).

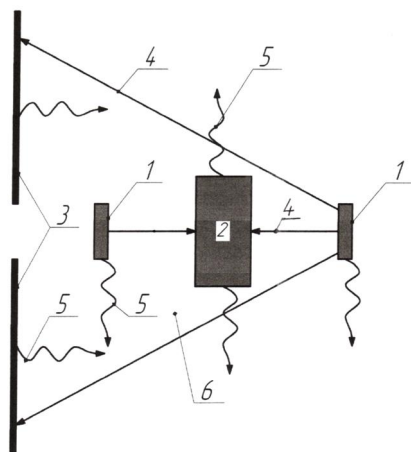


Рисунок 1. Распределение энергии в производственном помещении: 1 – электронагреватели; 2 – ОПМ; 3 – энергосберегающие экраны; 4 – поток лучистой энергии; 5 – конвективная теплоотдача энергии; 6 – нерабочее пространство производственного помещения

Из уравнения (2) следует, что для поддержания температуры воздуха на уровне $t_1=5$ °C требуется мощность $q = 20,87$ кВт.

Дефицит мощности 2,87 кВт восполняется подключением из группы поддержки двух масляных низкотемпературных электронагревателей. Основная же задача этой группы состоит в обеспечении температуры воздуха в помещении на уровне $t_1=5$ °C в часы отсутствия рабочего процесса в рабочие дни, а также круглосуточно – в выходные. Для обеспечения такого обогрева требуется 11 электронагревателей с номинальной мощностью 2 кВт (например «De Longhi», производства Италии), равномерно распределённых по периметру помещения.

Исходя из сказанного, в качестве примера можно составить регламент работы системы дифференцированного электрообогрева на один из месяцев отопительного периода (ноябрь, 2011г.) и определить месячный расход энергии и стоимость обогрева. Выбранный месяц включает 30 дней, из которых 21 день – рабочие (работа в одну 8 часовую смену) и выходные – 9 дней.

Регламент работы системы за указанный месяц включает следующие основные процедуры.

1. Штатный режим работы системы обогрева ОПМ и нерабочего пространства. Как уже отмечалось, вся мощность 18 кВт, генерируемая группой электронагревателей TOP-1, включая мощность лучевого потока 4,29 кВт, поддерживающего температуру ОПМ на уровне 18 °C, в конечном итоге реализуется для поддержания температуры нерабочего пространства $t_1=5$ °C. При этом недостаток мощности 2,87 кВт восполняется конвективной теплоотдачей электронагревателей группы поддержки.

Учитывая продолжительность функционирования системы за рабочий день – 8 часов при количестве рабочих дней – 21, месячная затрата энергии составляет

$$Q_1=(18+2,87) \cdot 8 \cdot 21 \cdot 3600 \cdot 10^{-6}=12,62 \text{ (ГДж)}.$$

2. Объёмный обогрев помещения по окончании рабочего процесса. Он полностью обеспечивается объёмными электронагревателями группы поддержки, функционирует ежедневно по 16 часов и поддерживает температуру на уровне $t_1=5$ °C, развивая мощность 20,87 кВт. Месячная затрата энергии составляет

$$Q_2=20,87 \cdot 16 \cdot 21 \cdot 3600 \cdot 10^{-6}=25,24 \text{ (ГДж)}.$$

3. Объёмный обогрев производственного помещения в выходные и праздничные дни. Он осуществляется группой поддержки круглосуточно, в течение 9 дней и удерживает температуру на уровне $t_1=5$ °C. Месячная затрата энергии составляет

$$Q_3=20,87 \cdot 24 \cdot 9 \cdot 3600 \cdot 10^{-6}=16,23 \text{ (ГДж)}.$$

Существует, однако, ещё одно обстоятельство, требующее определённых дополнительных затрат электроэнергии. Оно связано с периодическими отключениями обогрева ОПМ по окончании 8 часового рабочего дня.

Отключения сопровождаются охлаждением твёрдой фазы ОПМ, в составе которой определяющую роль по массе 2120 кг играет станок. Для приведения твёрдой массы (станка) в рабочее состояние перед началом нового рабочего цикла необходимо предварительно нагреть станок до стандартной температуры $t_2=18$ °C. При этом для определения затраты энергии на восстановительный обогрев станка необходимо сначала рассмотреть динамику его охлаждения. Механизм расчёта этого процесса строится на основе совместного использования трёх определяющих факторов:

- уравнения динамического баланса процесса остывания станка;
- критериального уравнения теплоотдачи станка;
- закона конвективной теплоотдачи Ньютона.

В результате получена картина охлаждения станка, представленная графически на рис. 2. Из графика следует, что во временном

промежутке между окончанием предыдущей рабочей смены и началом следующей (интервал 16 часов) станок успевает остыть до температуры $t_2=8,7^{\circ}\text{C}$ (короткое охлаждение). При охлаждении станка за период, включающий два выходных дня (интервал 64 часа) его температура к началу очередной рабочей смены понижается до уровня температуры нерабочего пространства, т.е. $t_2=5^{\circ}\text{C}$ (длительное охлаждение).

В связи с этим возникает проблема организации упреждающего обогрева станка, доводящего его температуру к началу новой рабочей смены до стандартной величины $t_2=18^{\circ}\text{C}$. Поскольку при данных обстоятельствах персонал ОРМ ещё отсутствует, то упреждающий обогрев может быть интенсивным благодаря перемещению лучевых нагревателей практически вплотную к станине станка. В такой ситуации потери лучистой энергии в процессе обогрева практически отсутствуют и мощность лучевого обогрева станка определяется формулой

$$Q_r = 2PK_p, \quad (3)$$

где $P = 900 \text{ Вт}$ – номинальная мощность нагревателя TOP-1; $K_p=0,768$ – радиационный коэффициент.

Возможна иная форма определения мощности обогрева

$$Q_r = (CM\Delta t_2)/\Delta\tau, \quad (4)$$

где: $\Delta\tau$ – время упреждающего обогрева; $\Delta t_2 = t_{2K} - t_{2H}$ – прирост температуры станка в начале и в конце обогрева; M – масса станка; $C = 460 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ – удельная теплоёмкость материала станка.

Сочетание формул (3) и (4) приводит к следующему уравнению

$$t_{2K} = t_{2H} + \frac{2PK_p}{MC} \Delta\tau, \quad (5)$$

используя которое и график охлаждения станка (см. рис. 2.) можно построить зависимость температуры станка в конце обогрева t_{2K} от продолжительности обогрева $\Delta\tau$, т.е. $t_{2K} = f(\Delta\tau)$.

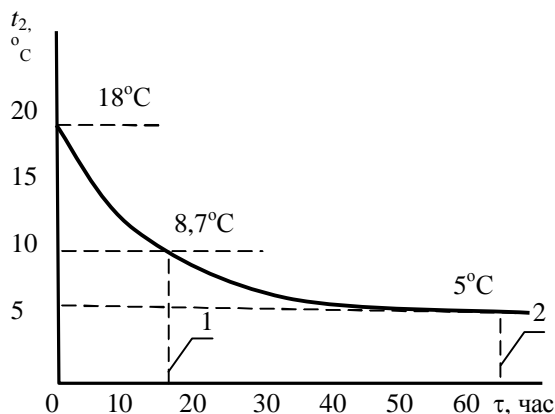


Рисунок 2. Динамика процесса охлаждения станка: 1 – граница зоны короткого охлаждения; 2 – граница зоны длительного охлаждения

Пониманию этой процедуры на примере короткого охлаждения станка способствует график на рис.3. На графике отступая влево от границы 1 (начало рабочей смены) откладывается параметр $\Delta\tau$ произвольной величины. На графике охлаждения находится соответствующая температура t_{2H} начала упреждающего обогрева. Подстановкой этих параметров в уравнение (5) вычисляется температура станка t_{2K} в начале рабочей смены. Повторением этой процедуры несколько раз получаем графическое изображение функции $t_{2K} = f(\Delta\tau)$. (см. рис.4), носящей линейный характер. Аналогично строится данная зависимость для случая длительного охлаждения станка.

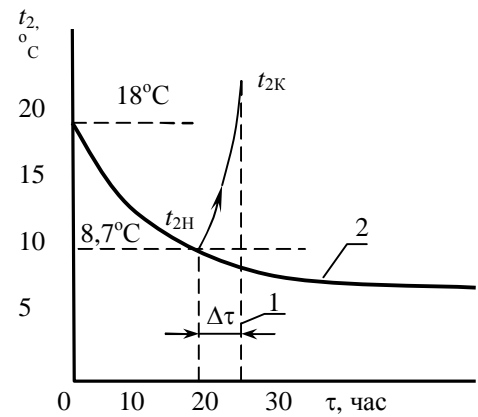


Рисунок 3. К вопросу о построении зависимости $t_{2K} = f(\Delta\tau)$: 1 – граница зоны короткого охлаждения; 2 – график охлаждения

Далее, точка пересечения линии $t_{2K} = f(\Delta\tau)$ с горизонтальной прямой, соответствующей штатной температуре $t_{2K} = 18^{\circ}\text{C}$, однозначно определяет требуемую продолжительность времени упреждающего обогрева станка. В случае короткого охлаждения $\Delta\tau = 1,7$ часа, а в случае длительного – $\Delta\tau = 2,38$ часа.

Полученная информация позволяет определить затраты энергии на упреждающий обогрев станка в случаях короткого и длительного охлаждения.

Короткое охлаждение: продолжительность обогрева 1,7 часа, применение обогрева 17 раз, мощность электронагревателей $P = 900 \text{ Вт}$, количество нагревателей 20 шт. Месячная затрата электроэнергии составляет

$$Q_4 = 900 \cdot 20 \cdot 1,7 \cdot 3600 \cdot 17 = 1,87 \text{ (ГДж)}.$$

Длительное охлаждение: продолжительность обогрева 2,38 часа, применение обогрева 4 раза, мощность электронагревателей $P = 900 \text{ Вт}$, количество нагревателей 20 шт. Месячная затрата электроэнергии составляет

$$Q_5 = 900 \cdot 20 \cdot 2,38 \cdot 3600 \cdot 4 = 0,62 \text{ (ГДж)}.$$

В итоге суммарная месячная затрата электроэнергии на обогрев производственного помещения составляет

$$Q_{\text{эл}} = \sum_{i=1}^5 Q_i = 56,38 \text{ (ГДж)}.$$

В соответствии с существующим стандартом объёмного обогрева производственных помещений системой пароводяного отопления температура воздуха в помещении должна удерживаться на уровне $t_1=18^\circ\text{C}$ круглосуточно.

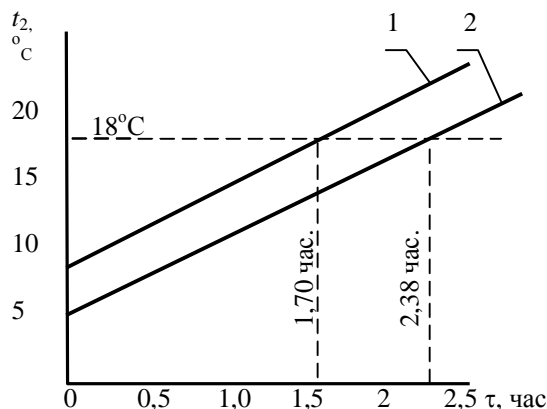


Рисунок 4. К определению продолжительности времени упреждающего обогрева станка: 1 – короткое охлаждение; 2 – длительное охлаждение

Энергетические затраты на тепловой нагрев помещения определяется т.н. уравнением теплопотребления [6], которое в данных условиях принимает следующий вид

$$Q_{\text{ТН}} = V_{\text{Н}} q_0 (t_1 - t_{\text{ср.0}}) n \cdot 24 \cdot 10^{-6} \text{ (ГДж)}, \quad (6)$$

где $n = 30$ суток – период отопления.

Из уравнения (6) следует $Q_{\text{ТН}} = 151,8$ ГДж.

Соответствующие вычисления, результаты которых представлены в табл. 1, приводят к следующим выводам.

Месячные затраты энергии на обогрев производственного помещения системой пароводяного отопления в 2,68 раза превосходят

аналогичные затраты системы дифференцированного электрообогрева.

При этом месячная себестоимость традиционного обогрева помещения в рублях в сравнении с электрообогревом обходится в 1,69 раза дороже.

Эти факты подтверждают достаточно высокую экономичность и перспективность метода дифференцированного электрообогрева и целесообразность его внедрения в эксплуатацию.

Литература

1. Лепеш Г.В., Сухов Г.С., Карп Л.В. Разработка технологии обогрева помещений приборами бытового назначения. Инновации. 5(127), май, 2009. стр. 103-108.
2. Лепеш Г.В., Сухов Г.С., Карп Л.В., Шмелёв М.Ю. Разработка экспериментально-методического обеспечения для исследования физических характеристик радиационных электронагревателей. Техника-технологические проблемы сервиса. №1(1) 2007г. стр. 22-33.
3. Сухов Г.С., Лепеш Г.В., Карп Л.В. Теоретические основы технологии дифференцированного электрообогрева производственных помещений. Постановка задач и математическая модель. Техника-технологические проблемы сервиса. №1(11) 2010г. стр. 29-36.
4. Сухов Г.С., Лепеш Г.В. Теоретические основы технологии дифференцированного электрообогрева. Расчёт теплоотдачи объёма рабочего места. Техника-технологические проблемы сервиса. №3(17) 2011г. стр. 42-45.
5. Сухов Г.С., Лепеш Г.В. Теоретические основы технологии дифференцированного электрообогрева производственных помещений. Расчёт обогрева объёма рабочего места. Техника-технологические проблемы сервиса. №3 (21). 2012г. стр. 22-25.
6. Тепловые процессы и теплоиспользующие оборудование предприятий бытового обслуживания. Справочное пособие/ А.Г. Сапронов, Б.М. Благушин, В.И. Тимченко, В.А. Шаповалов. – Ленпромбытиздат.1990.- 432с.

Таблица 1. Итоговые расчётные данные

Системы обогрева помещений	Официальные тарифы на теплоносители В СПб на 2011г.	Унифицированные тарифы, Руб/Дж	Месячный расход энергии на обогрев помещения, ГДж	Месячная стоимость на обогрев помещения, руб
Пароводяное отопление	1207,34 Руб/Гкал	$0,29 \cdot 10^{-6}$	151,8	44022
Дифференци-рованный электрообогрев	1660 Руб/МВт·час	$0,46 \cdot 10^{-6}$	56,58	26027

¹ Сухов Герман Саулович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Машины и оборудование бытового и жилищно-коммунального назначения», СПбГУСЭ, тел.(факс): (812)362-442-13;

² Лепеш Григорий Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Машины и оборудование бытового и жилищно-коммунального назначения», СПбГУСЭ. тел.(факс): (812)362-44-13, моб.: +7 921 751 28 29, e-mail: gregoryl@yandex.ru