

3. Игнатъев, Н.П. Антенны и радиоволновые устройства / Н.П. Игнатъев. – М.: Высшая школа, 2010. – 350 с.

4. Маслов, К.А. Стоячие волны в радиотехнике / К.А. Маслов. – М.: Радио и связь, 2003. – 190 с.

5. Кочетков, А.В. Радиосистемы и антенны / А.В. Кочетков. – Казань: Казанский университет, 2015. – 290 с.

6. Лебедев, И.М. Теория антенн / И.М. Лебедев. – М.: Современные технологии, 2012. – 218 с.

7. Петросян, Н.С. Специальные функции: учеб. пособие / Н.С. Петросян. – М.: ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», 2015. – 88 с.

8. Петров, А.И. Антенны и их параметры / А.И. Петров. – М.: Энергия, 2017. – 330 с.

9. Сергеева, Н.В. Основы распространения радиоволн / Н.В. Сергеева. – М.: ИНФОРМАЦИЯ, 2019. – 180 с.

10. Тихонов, А.Н. Радиоволны и их технологии / А.Н. Тихонов. – М.: Высшая школа, 2014. – 240 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 19.02.2025

УДК 697.273

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-168-2-13-17>

## МОДУЛЬНАЯ ИНФРАКРАСНАЯ СИСТЕМА ОТОПЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОРПУСОВ

**Е.С. Шмелев,**

*Ученый секретарь Института энергетики НАН Беларуси, канд. техн. наук*

**А.П. Ахрамович,**

*ведущ. науч. сотр. Института энергетики НАН Беларуси, канд. техн. наук*

**К.В. Гаркуша,**

*ст. преподаватель каф. энергетики БГАТУ*

*В статье рассмотрена модульная инфракрасная система отопления крупногабаритных производственных корпусов и показаны ее преимущества. Описаны структура и функционирование инфракрасного модуля. Приведены основные положения управления тепловыми условиями.*

*Ключевые слова: электрические высокотемпературные излучатели, отражатель с кусочно-непрерывным профилем поверхности, инфракрасный обогрев, модульная система отопления, тепловая модель, управление, энергоэффективность.*

*The article considers a modular infrared heating system for large-sized buildings and presents its advantages. The structure and functioning of the infrared module are described. The basic provisions of thermal conditions control are given.*

*Key words: electric high temperature emitters, reflector with a piecewise continuous surface profile, infrared heating, modular heating system, thermal model, regulation, energy efficiency.*

### Введение

Сельскохозяйственное машиностроение является одной из ведущих отраслей экономики Республики Беларусь. Производство тракторов, комбайнов, навесной и прицепной техники обеспечивает не только внутренние потребности, но и вносит значительный вклад в экспортный потенциал государства. Сохранение и укрепление конкурентоспособности продукции требуют постоянного обновления, модернизации производства, внедрения инновационных технологий. Для эффективной работы современного оборудования необходимо жесткое соблюдение технологического регламента, в том числе строгое поддержание требуемых микроклиматических параметров. Учитывая, что изготовление крупногабаритных изделий производится в цехах площадью в тысячи квадратных метров и с высотой пролетов свыше де-

вяти метров, то эта задача является сложной. Традиционно обогрев таких цехов осуществляется воздушной отопительной системой, совмещенной с вентиляцией. Выход нагретого воздуха производится над рабочей зоной, в результате чего значительная часть тепла уносится в верхнюю область цеха. Большой расход энергии сказывается и на себестоимости продукции.

Альтернативный (инфракрасный) способ отопления использует радиационный механизм переноса энергии. В этом случае обогревается не весь объем помещения, а только облучаемые объекты, что резко сокращает расход энергии. Преимущества данного способа неоднократно доказывались и теоретически, и на практике [1-5].

Вопросам лучистого обогрева посвящены работы Ф.А. Миссенара, А.И. Богомолова, А. Мачкаши, А.К. Родина, Н.Н. Болотских и других.

Применение электрических излучателей придает дополнительные положительные качества инфракрасным системам – гигиеничность, экологичность, гибкость управления (регулирования), простота монтажа, четкий контроль и учет расхода энергии. Это направление в отоплении начало активно развиваться в Беларуси в начале двухтысячных годов (от обогрева отдельных производственных участков – к проектированию систем для цехов) [6, 7]. Несмотря на значительную экономию энергии при использовании электрических инфракрасных систем, особенно заметную в производственных крупногабаритных корпусах (почти в два раза в пересчете на условное топливо), они не нашли к настоящему времени должного применения. Одной из причин этого является индивидуальная разработка системы для каждого объекта.

Производственные корпуса предприятий машиностроения, в том числе и сельскохозяйственного, построены в основном в прошлом веке в соответствии с технологическими нормами проектирования. В этих документах регламентированы размеры зданий – сетка колонн, высота, площади цехов. Такой подход допускает стандартизацию строительных конструкций, а для систем инфракрасного отопления позволяет применить блочный принцип (модульность системы), который упрощает и процесс проектирования. Он дает возможность выбора типовых модулей и компоновки из них системы лучистого обогрева.

Целью настоящей работы является математическое моделирование процессов теплообмена при использовании модульной электрической инфракрасной системы отопления для крупногабаритных производственных корпусов.

### Основная часть

*Инфракрасный модуль* предназначен для обогрева участка цеха. Он содержит комплект электрических инфракрасных излучателей, систему автоматического управления, кабельную продукцию и коммутационную аппаратуру. Наличие кран-балок в производственных цехах крупногабаритных корпусов ограничивает размещение инфракрасных излучателей, позволяя устанавливать их только в местах, где они не будут препятствовать передвижениям талей. В связи с этим наиболее подходящими излучателями будут высокотемпературные, у которых температура излучающей поверхности достигает  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  и выше, а удельный лучистый поток порядка  $104\text{--}105\text{ Вт/м}^2$  [8, 9]. Благодаря этому они оказывают тепловое воздействие на рабочую зону даже при большой высоте подвеса.

Излучатель представляет собой прямоугольный короб, внутри которого расположены трубчатые электронагреватели (ТЭНы) и отражатель из металлического полированного листа. Распределение лучистого потока в пространстве зависит от геометрической формы поверхности отражателя. Анализ конструкций рефлекторов лучистой энергии [10, 11] показал, что относительно простым и в то же время допускающим возможность получить нужное распре-

деление потока по облучаемой площади, является отражатель с кусочно-непрерывным профилем поверхности, представляющий собой две пересекающиеся под углом пластины. Варьируя углом раскрытия отражателя, можно управлять потоком, т.е. сделать его узконаправленным или, наоборот, расходящимся.

С увеличением высоты подвеса расширяется площадь радиационного воздействия и уменьшается величина удельной плотности падающего на облучаемую поверхность лучистого потока. Также увеличивается длина пробега лучей и, соответственно, экстинкция излучения. В данных условиях инфракрасный модуль обеспечения микроклимата целесообразно выполнять с двумя секциями излучателей: верхней (излучатели расположены на высоте колонн и обеспечивают, так называемую, «фоновую температуру») и нижней, поддерживающей требуемые тепловые условия (излучатели расположены на стенах или на специальных конструкциях над рабочей зоной, в тех местах, где они не будут препятствовать перемещению деталей и узлов изготавливаемых агрегатов).

Система управления включает датчики температуры, блок обработки данных от датчиков и выдачи сигнала на исполнительное устройство, линии передачи данных.

*Тепловая модель.* К настоящему времени существуют разнообразные подходы к математическому моделированию теплового режима здания (помещения). Усложнение математической модели требует увеличения размерности задачи и зачастую приводит к необходимости больших машинных ресурсов для ее решения. Упрощенная физическая модель более эффективна для разработки алгоритма управления обогревом, чем сложная модель с детальным учетом всех тепловых процессов. Таким образом, основное внимание сосредоточим на доминирующих факторах воздействия и используем простые балансные соотношения энергии как, например, в работах [12–14].

Участок цеха, обогреваемый инфракрасным модулем, представим в виде прямоугольного параллелепипеда, со всех сторон ограниченного ограждающими конструкциями (наружными или внутренними), через которые передается тепло. При отсутствии ограждения с какой-либо стороны, теплообмен с соседними участками происходит за счет конвекции воздуха.

На участке расположено технологическое оборудование, выделяющее тепло при работе станков, величина которого зависит от мощности установленных электродвигателей. Вентиляция может быть совмещена с отоплением. В этом случае обогрев производится совместно инфракрасной и воздушной системами отопления. При этом выходная температура вентиляционного воздуха может быть снижена по сравнению с чисто воздушным отоплением.

Разделим условно рассматриваемый участок по высоте на две области: нижнюю (рабочая зона высотой  $H_w$ ) и верхнюю (над рабочей зоной до уровня подвеса излучателей).

Запишем уравнения сохранения энергии для воздуха, обозначив параметры, относящиеся к этим об-

ластям, индексами: «w» – для нижней и «u» – для верхней. При этом не учитываем радиационный теплообмен между поверхностями оборудования и ограждений в силу доминирования лучистых потоков от инфракрасных излучателей, а также теплообмен с примыкающими участками, приняв, что тепловые условия одинаковы.

Уравнения сохранения энергии для воздуха:

$$\frac{dT_{u,w}}{d\tau} = \frac{1}{(C\rho V)_{u,w}} \sum_{i=1}^8 (q_i)_{u,w}, \quad (1)$$

где  $T$  – температура воздуха, К;

$\tau$  – время, с;

$C$  – удельная изобарная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К);

$\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – объем воздуха, м<sup>3</sup>;

$q_i$  – мощность притоков или стоков тепла, Вт (индекс  $i$  обозначает объект, участвующий в теплообмене: 1, 2 – верхняя и нижняя секции излучателей; 3 – вентиляция; 4 – технологическое оборудование; 5 – боковые ограждения; 6 – перекрытие; 7 – пол; 8 – теплообмен между верхней и нижней областями).

Теплопередачу через ограждения опишем одномерными нестационарными уравнениями теплопроводности с граничными условиями третьего рода, в которых учтен и тепловой поток от инфракрасных излучателей. Теплообмен между воздухом и поверхностями оборудования подчиняется закону Ньютона-Рихмана. Падающий на них лучистый поток учитывается как внутреннее тепловыделение, добавляемое к тепловыделению от работающих электродвигателей. Теплообмен между верхней и нижней областями происходит вследствие естественной конвекции воздуха из-за различия плотностей. Приняв широко распространенное в задачах теплообмена в помещениях приближение Буссинеска (зависимость плотности воздуха только от температуры) и учитывая, что при инфракрасном обогреве изменение температуры воздуха по высоте верхней области составляет 0,15-0,25 К/м (примерно в 10 раз меньше, чем при воздушном отоплении [15]), можно считать, что тепловой поток между областями является линейной функцией разности температур воздуха в верхней и нижней областях:  $q_8 = K_{uw}(T_w - T_u)$ , в которой коэффициент пропорциональности  $K_{uw}$  зависит от градиента температуры, размеров участка и заполненности его оборудованием.

В систему уравнений тепловой модели, помимо уравнения сохранения энергии для воздуха, включим аналогичные уравнения для технологического оборудования и пола. Теплотери через пол значительно меньше, чем через боковые ограждения, поэтому ими пренебрежем.

Для решения системы уравнений к граничным условиям третьего рода дополнительно задаются начальные условия (температура воздуха в обеих областях, оборудования, пола, и ограждений) и распределение лучистого потока.

В результате система уравнений имеет следующий вид:

$$\frac{dT_u}{d\tau} = \frac{1}{(C\rho V)_u} [q_1\varepsilon_{1u} + q_3\varepsilon_{3u} + (\alpha F)_{5u} \times (T_{5u}^{in} T_u) + (\alpha F)_{6u} (T_{6u}^{in} T_u) + K_{uw} (T_w T_u)]; \quad (2)$$

$$\frac{dT_w}{d\tau} = \frac{1}{(C\rho V)_w} [q_1\varepsilon_{1w} + q_2\varepsilon_{2w} + q_3\varepsilon_{3w} + (\alpha F)_{4w} (T_4 - T_w) + (\alpha F)_{5w} (T_{5w}^{in} - T_w) + \alpha_{7w} F_7 (T_7 - T_w) - K_{uw} (T_w T_u)]; \quad (3)$$

$$\frac{dT_4}{d\tau} = \frac{1}{(C\rho V)_4} [q_4 + q_1\varepsilon_{4u} + q_2\varepsilon_{4w} - (\alpha F)_{4w} (T_4 - T_w)]; \quad (4)$$

$$\frac{dT_7}{d\tau} = \frac{1}{(C\rho V)_7} [q_1\varepsilon_{7u} + q_2\varepsilon_{7w} (\alpha F)_7 (T_7 - T_w)], \quad (5)$$

$$\frac{\partial(T_i)_{u,w}}{\partial\tau} - (a_i)_{u,w} \frac{\partial^2(T_i)_{u,w}}{\partial(y_i^2)_{u,w}} = 0; \quad (6)$$

$$-(\lambda_i)_{u,w} \frac{\partial(T_i)_{u,w}}{\partial(y_i)_{u,w}} \Big|_{(y_i)_{u,w}=0} = q_1 \frac{(\varepsilon_i)_{u,w}}{(F_i)_{u,w}} + q \frac{(\varepsilon_i)_{u,w}}{(F_i)_{u,w}} + (a_i)_{u,w} (T_{u,w} - (T_i^{in})_{u,w}) \Big|_{(y_i)_{u,w}=0}; \quad (7)$$

$$-(\lambda_i)_{u,w} \frac{\partial(T_i)_{u,w}}{\partial(y_i)_{u,w}} \Big|_{(y_i)_{u,w}=(\Delta_i)_{u,w}} = \alpha_{out} \times \left[ \left( (T_i^{out})_{u,w} \right) \Big|_{(y_i)_{u,w}=(\Delta_i)_{u,w}} - T_{out} \right], \quad (8)$$

$i = 5, 6$

где  $\alpha$  – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;

$T_{out}$  – температура наружного воздуха, К;

$\lambda$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К);

$\Delta$ ,  $y$  – полная толщина ограждения и текущая, отсчитываемая от внутренней поверхности, м.

Коэффициенты  $(\varepsilon_i)_{u,w}$  обозначают долю энергии от инфракрасных излучателей и вентиляции, приходящуюся на  $i$ -й объект, участвующий в теплообмене. Нагрев воздуха при прохождении лучистого потока происходит в результате его поглощения.

Тепловая модель позволяет найти закономерности изменения мощности инфракрасного модуля, обеспечивающего заданную температуру при наличии возмущающих факторов. При этом возможна оптимизация его работы за счет наложения дополнительных условий, например минимизации потребления электроэнергии или денежных затрат на обогрев.

Управление инфракрасным модулем. Алгоритм управления инфракрасным модулем должен учитывать организацию работ на участке и поддержание

тепловой обстановки в соответствии со строительными, санитарными и технологическими нормами.

Производственный участок функционирует в двух режимах: рабочем, во время которого происходит производственный процесс, и дежурном, когда работы не производятся. При программировании управления инфракрасным модулем на большой срок следует учитывать также выходные и праздничные дни. В дежурном режиме вентиляция отключена и поддержание нормированной температуры воздуха (не ниже 5 °С) [16] производится только верхней секцией инфракрасных излучателей.

Установленная мощность инфракрасного модуля должна быть достаточной, чтобы обеспечить нормируемые температуры в рабочей зоне при расчетной температуре наружного воздуха [17].

Высокотемпературные инфракрасные излучатели характеризуются ограниченной возможностью изменения мощности. Уменьшение даже на треть от номинальной резко снижает эффективность излучателя, как генератора лучистой энергии. Таким образом, для этих аппаратов целесообразен прерывистый режим работы.

Используемые в инфракрасном модуле высокотемпературные излучатели имеют по три нагревательных элемента (ТЭНа), которые могут объединяться в группы по несколько элементов. Одним из вариантов является разделение всех ТЭНов на три группы, каждая из которых содержит по одному элементу каждого излучателя. Поддержание нормируемых тепловых условий производится следующим образом: показания температуры в контрольных точках передаются в расчетный блок, где происходит их обработка и сравнение с заданными значениями, затем выдается команда на включение или выключение групп ТЭНов.

Перед началом рабочей смены осуществляется «натоп» производственного участка. В нашем случае это означает включение верхней секции излучателей на полную мощность, а при необходимости, подключение и нижней секции. В начале рабочей смены начинает работать технологическое оборудование и система вентиляции, которые приносят тепловую энергию, позволяя снизить мощность секций инфракрасных излучателей.

Система управления должна иметь возможность адаптации под конкретные условия – корректировки параметров регулятора в зависимости от изменения характеристик объекта управления.

### Заключение

Ввод в эксплуатацию Белорусской АЭС предоставил возможность широкомасштабного внедрения инновационных электротехнологий.

Предложенное направление разработки инфракрасных систем отопления крупногабаритных производственных корпусов (переход на модульную систему) допускает стандартизацию и серийное изготовление оборудования. Это ведет к упрощению процесса их проектирования и снижению стоимости.

Работы по созданию инфракрасных модульных систем отопления с электрическими излучателями будут

способствовать внедрению эффективного метода отопления на предприятиях и решению вопроса наращивания рационального потребления электроэнергии.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Миссенар, Ф.А. Лучистое отопление и охлаждение / Ф.А. Миссенар. – М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961. – 299 с.
2. Богомолов, А.И. Газовые горелки инфракрасного излучения и их применение / А.И. Богомолов, Д.Я. Вигдорчик, М.А. Маевский. – М.: Стройиздат, 1967. – 254 с.
3. Мачкаши, А. Лучистое отопление / А. Мачкаши, Л. Банхиди. – М.: Стройиздат, 1985. – 464 с.
4. Родин, А.К. Газовое лучистое отопление / А.К. Родин. – Л.: Недра, 1987. – 191 с.
5. Болотских, Н.Н. Инфракрасное отопление производственных помещений / Н.Н. Болотских // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 4. – С. 27-32.
6. Ахрамович, А.П. Об эффективности использования электрических ИК-систем в цехах машиностроительных предприятий / А.П. Ахрамович, Г.М. Дмитриев, В.П. Колос // Энергоэффективность. – 2013. – № 6. – С. 22-23.
7. Ахрамович, А.П. Оптимизация систем инфракрасного обогрева производственных цехов / А.П. Ахрамович, Г.М. Дмитриев, В.П. Колос // Промышленная теплотехника. – 2012. – Т. 34, № 2. – С. 77-80.
8. Лепеш, Г.В. Способ энергоэффективного обогрева вентилируемых помещений / Г.В. Лепеш, Т.В. Потемкина // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2014. – № 4 (30). – С. 42-54.
9. Ахрамович, А.П. Развитие инфракрасного электрообогрева в Республике Беларусь / А.П. Ахрамович, Е.С. Шмелев // Энергоэффективность. – 2021. – № 9. – С. 30-32.
10. Расчет пространственного распределения энергии сложного излучателя / И.Е. Евдокимов [и др.] // Вестник Самарского государственного университета. Серия: Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2013. – № 1 (39). – С. 214-220.
11. Иванникова, Н.В. Геометрические модели, алгоритмы проектирования и поиска эффективных параметров рефлекторов технологического назначения: дисс. ... канд. техн. наук: 05.01.01/ Иванникова Наталья Владимировна; Омский гос. технический университет. – Омск, 2017. – 114 с.
12. Строй, А.Ф. Управление тепловым режимом зданий и сооружений / А.Ф. Строй. – Киев: Вища школа, 1993. – 154 с.
13. Табунщиков, Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
14. Нагорная, А.Н. Математическое моделирование и исследование нестационарного теплового ре-

жима зданий: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Нагорная А.Н.; Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск, 2008. – 148 с.

15. Сканава, А.Н. Конструирование и расчет водяного и воздушного отопления зданий / А.Н. Сканава. – М.: Стройиздат, 1983. – 304 с.

16. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: СН 4.02.03-2019. – Минск: Мин-во строительства и архитектуры Респ. Беларусь, 2020. – 68 с.

17. Строительная климатология. Изменение № 1: СНБ 2.04.02-2000. – Минск: Мин-во строительства и архитектуры Респ. Беларусь, 2007. – 33 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 18.12.2024

УДК 66.087.5:628.3:681.3

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-168-2-17-24>

## МЕХАНИЗМ КОАГУЛЯЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД НАРУЖНОЙ МОЙКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

М.А. Бойко,

ст. преподаватель каф. электроснабжения и электротехники БГАТУ

А.В. Крутов,

доцент каф. электроснабжения и электротехники БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

*В статье рассмотрен механизм коагуляции коллоидных частиц загрязнений в сточных водах наружной мойки сельскохозяйственной техники. Определены режимы электрообработки. Приведены результаты экспериментальных исследований.*

*Ключевые слова: коллоидные дисперсии, коагуляция, гидроксид железа, двойной электрический слой, мицелла, потенциалопределяющие ионы, противоионы, дзета-потенциал.*

*The article considers the mechanism of coagulation of colloidal particles of pollutants in wastewater of external washing of agricultural machinery. The modes of electrical treatment are determined, and the results of experimental studies are given.*

*Key words: colloidal dispersions, coagulation, iron hydroxide, double electric layer, micelle, potential-determining ions, counterions, zeta potential.*

### Введение

В соответствии с санитарными нормами [1] на территории машинного двора должен предусматриваться участок мойки транспорта (открытая или закрытая мойка с отстойниками для предварительной очистки стоков). После первичного отстойника и удаления всплывших нефтепродуктов, сточные воды наружной мойки сельскохозяйственной техники представляют собой дисперсную систему, содержащую в себе суспензии, коллоидные частицы различной химической природы и размеров. В стоках наружной мойки присутствуют почвенно-растительные примеси и различные топливно-смазочные фракции. В зависимости от выполняемых работ могут появляться включения минеральных и органических удобрений, патогенных организмов. Отведение таких стоков в канализацию или на рельеф допустимо только после их очистки. Анализ существующей практики очистки подобных стоков показал целесообразность применения электрохимической коагуляции загрязнений, их окисления и обеззараживания. В процессе электрохимической очистки про-

исходит удаление взвешенных веществ, нефтепродуктов, а также других загрязнений до показателей, предусмотренных в источниках [2, 3]. Очищенная вода может использоваться в оборотных системах водоснабжения моек. При использовании очищенных стоков в открытых системах технического водоснабжения не только достигается их эпидемиологическая безопасность, соответствие требованиям моечных устройств по качеству воды, а также обеспечиваются ее безвредность по химическому составу и благоприятные органолептические свойства.

Известна теория устойчивости и коагуляции дисперсных систем Дерягина-Ландау-Фервея-Овербека (теория ДЛФО). Проблеме очистки и обеззараживания сточных вод различных производств посвящены работы В.Я. Баранова, О.Р. Каратаева, И.А. Нечаева, Т.А. Савицкой, О.В. Смирнова, Л.И. Соколова, R. Hogg (Р. Хогга), Р. К. Holt (П.К. Холта), О.С. Хрипуновой и других [4-12].

Целью данной работы является снижение концентрации загрязнений сточных вод наружной мойки сельскохозяйственной техники до допустимых пока-