



УДК 697.1:621.565.83:631.223.6

А. Е. РУИН, аспирант, асс. кафедры отопления и вентиляции

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ РАДИАЦИОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ СВИНОКОМПЛЕКСАХ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-54-85; факс: (831) 430-19-36; эл. почта: ruin199920@yandex.ru

Ключевые слова: радиационное охлаждение, тепловое излучение, холодоснабжение, теплофизика, энергосбережение, энергоэффективность, охлаждающая панель.

Приведены статистические данные по амплитуде колебания температуры и относительной влажности наружного воздуха. Описаны наиболее предпочтительные климатические условия применения радиационного охлаждения. Рассмотрены зависимости для определения температурного безразличия для разных возрастных групп животных на примере свиней. Разработана общая теплофизическая модель свиноводческого здания при расчете радиационного охлаждения.

В настоящее время наиболее распространенным видом производства мяса и мясных продуктов является интенсивное свиноводство, при котором значительно увеличивается количество выпускаемой продукции за счет поточной технологии откармливания свиней. Во всем цикле производства животные находятся в замкнутом пространстве свиноводческого предприятия (безвыгульная система содержания свиней), в результате чего животные постоянно находятся под влиянием внутренней (постоянные выделение теплоты, влаги, аммиака, углекислого газа, сероводорода) и наружной (колебания температуры и влажности наружного воздуха) окружающей среды. При бездействии вышеперечисленные факторы негативно влияют на животных: снижается прирост массы тела, повышается падеж молодняка, учащаются случаи инфекционных заболеваний, что отражается на количестве и качестве выпускаемой продукции и, как следствие, на рентабельности всего производства.

В теплый период года животные, находящиеся в безвыгульной системе содержания, зачастую испытывают тепловой стресс на фоне повышения температуры внутреннего воздуха за счет повышения температуры наружного воздуха и постоянных биологических тепловыделений в обитаемом помещении. При тепловом стрессе у животных нарушается процесс терморегуляции, ухудшается теплообмен с окружающей средой, у них снижается активность, потребление корма и при значительном перегреве начинается потеря веса [1]. Для максимального набора массы животное не должно испытывать дискомфорт от микроклимата помещения, т.е. находиться в зоне температурного безразличия. Согласно действующим в нашей стране методическим рекомендациям по проектированию свиноводческих ферм РД-АПК 1.10.02.04, температура в рабочей зоне свиней на откорме должна быть не менее +14 °С для холодного и не более +26...28 °С для теплого периодов года.

Верхний порог температуры внутреннего воздуха в помещении содержания свиней, за счет большого количества биологических тепловыделений и солнечной



радиации, может достигаться уже при температуре наружного воздуха выше $+16^{\circ}\text{C}$. Анализируя колебания температуры и относительной влажности наружного воздуха в теплый период года для Нижнего Новгорода за 2024 год (рис. 1), можно сказать, что температура наружного воздуха выше $+16^{\circ}\text{C}$ поддерживалась значительное количество времени.

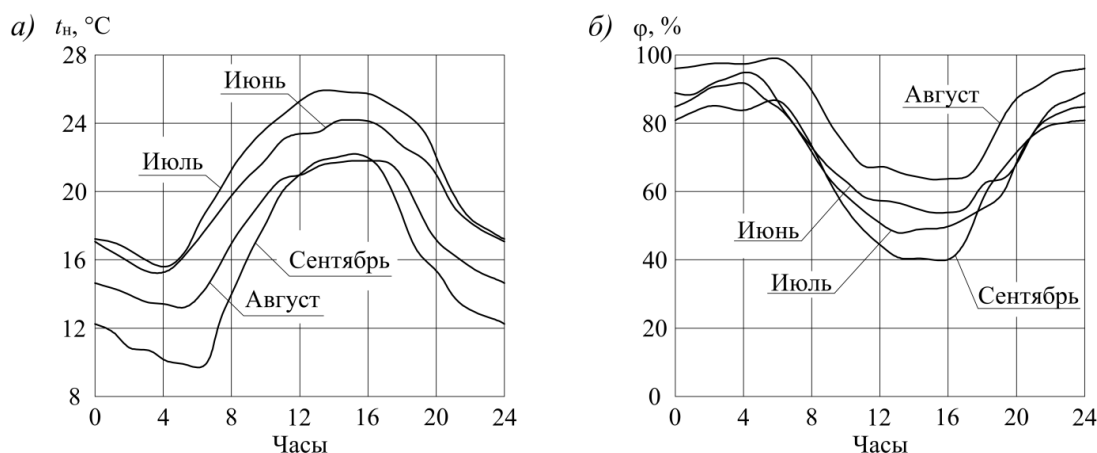


Рис. 1. Осредненные суточные колебания температуры (а) и относительной влажности (б) в теплый период года

Таким образом, для поддержания требуемого температурного режима в зоне обитания свиней возникает необходимость в отводе избыточной явной теплоты. Автором предлагается применение инновационной системы охлаждения, в основе которой лежит принцип лучистого теплообмена – радиационного охлаждения.

Система радиационного охлаждения в работе и расчете аналогична системам лучистого отопления, они изменяют общую температурную обстановку в помещении, тем самым повышают качество микроклимата при более высокой (для охлаждения) или более низкой (при отоплении) температуре внутреннего воздуха [2-3]. По аналогии с системами лучистого отопления допускается повышать расчетную температуру внутреннего воздуха до 4°C , без снижения теплового комфорта [2].

Система радиационного охлаждения представляет собой комплекс элементов различного назначения (излучающие панели или профили, трубопроводы, источник холода), в качестве хладоносителя применяется охлажденная в тепловом насосе вода, артезианская вода и прочие водные растворы. Параметры температуры хладоносителя выбираются таким образом, чтобы не допустить конденсацию влаги на основных теплообменных поверхностях.

Применение систем радиационного охлаждения ограничивается климатическими условиями региона строительства. Для применения таких систем охлаждения наиболее благоприятным условием будет сухой атмосферный воздух, т.к. в противном случае на излучающих элементах системы возможна конденсация влаги. Для обеспечения требуемой мощности системы охлаждения, при повышении относительной влажности, для исключения выпадения конденсата, необходимо увеличивать температуру хладоносителя, а как

следствие, и площадь теплообмена излучающих элементов, что значительно увеличивает капитальные затраты. Данная особенность значительно снижает применение систем радиационного охлаждения в промышленных и общественных зданиях в нормальном и влажном климатических регионах. В животноводческих зданиях допускается конденсированные влаги, что дает возможность применения радиационного охлаждения в независимости от климатического региона.

Для расчета систем радиационного охлаждения необходимо определить требуемое сочетание температуры внутреннего воздуха $t_{в}$, °С, и общую радиационную температуру в помещении, с учетом постоянных тепловыделений от животного $Q_{л+к}^c$, Вт. Чтобы определить точные зависимости требуемых величин, необходимо составить уравнение лучисто-конвективного баланса, которое будет иметь вид:

$$Q_{л+к}^c = F_{л}^c \cdot \sum c_{c-i} \cdot \varphi_{c-i} \cdot b_{c-i} \cdot (\tau_c - \tau_i) + F_{к}^c \cdot \alpha_k^c \cdot (\tau_c - t_{в}), \quad (1)$$

где $F_{л}^c$, $F_{к}^c$ – площади поверхности тела свиньи, которая участвует в лучистом и конвективном теплообмене, соответственно, м²;

c_{c-i} – приведенный коэффициент излучения в системе теплообмена свиньи с i -ой ограждающей конструкцией, Вт/(м²·К⁴).

Угловой коэффициент лучистого теплообмена φ_{c-i} показывает процент от суммарного лучистого потока теплоты животного, попадающего на поверхность (для свиначников допустимо принимать 0,93...0,95).

Величина температурного коэффициента b_{c-i} находится по номограммам, представленным в [3].

Температура поверхности тела животного τ_c в общем случае представляет температуру волосяного покрова животных.

Температуру i -ой поверхности τ_i , участвующей в теплообмене с животным, для данного уравнения можно принять как среднюю радиационную температуру помещения t_R , °С.

Коэффициент конвективного теплообмена α_k^c , Вт/(м²·°С), характеризует интенсивность теплообмена между телом свиньи и окружающей ее воздушной средой.

Согласно [3] часть лучистой энергии в зданиях содержания животных поглощается многоатомными газами, они поглощают до 13 % лучистой энергии, тогда уравнение (1) будет иметь вид:

$$Q_{л+к}^c = 0,87 \cdot F_{л}^c \cdot \sum c_{c-i} \cdot \varphi_{c-i} \cdot b_{c-i} \cdot (\tau_c - t_R) + F_{к}^c \cdot \alpha_k^c \cdot (\tau_c - t_{в}). \quad (2)$$

В уравнении (2) произведение элементов $\sum c_{c-i}$, φ_{c-i} , b_{c-i} лучистой составляющей теплообмена можно записать как коэффициент лучистого теплообмена $\alpha_{л}^c$, Вт/(м²·°С), тогда получим:

$$Q_{л+к}^c = 0,87 \cdot F_{л}^c \cdot \alpha_{л}^c \cdot (\tau_c - t_R) + F_{к}^c \cdot \alpha_k^c \cdot (\tau_c - t_{в}). \quad (3)$$

Уравнение (3) можно записать в виде зависимости t_R от $t_{в}$:

$$t_R = \frac{0,87 \cdot F_{л}^c \cdot \alpha_{л}^c \cdot \tau_c + F_{к}^c \cdot \alpha_k^c \cdot \tau_c - Q_{л+к}^c}{0,87 \cdot F_{л}^c \cdot \alpha_{л}^c} - \frac{F_{к}^c \cdot \alpha_k^c}{0,87 \cdot F_{л}^c \cdot \alpha_{л}^c} \cdot t_{в}. \quad (4)$$



Решение уравнения (4) относительно t_R при значениях явной теплоты $Q_{\text{я}}$ приводит к уравнению зоны максимальной продуктивности, которое в общем виде будет иметь вид:

$$t_R = B - A \cdot t_{\text{в}}, \quad (5)$$

где A , B – постоянные в уравнении температурной зоны максимальной продуктивности животного.

Уравнения температурной зоны максимальной продуктивности для различных возвратных групп животных приведены в таблице.

Таблица

Уравнения зоны максимальной продуктивности животных

Группа животных	Уравнение зоны максимальной продуктивности
Хряки-производители	$t_R = 20,66 - 0,46 \cdot t_{\text{в}} \pm 1,4, ^\circ\text{C}$
Матки холостые и супоростные	$t_R = 28,02 - 0,46 \cdot t_{\text{в}} \pm 1,4, ^\circ\text{C}$
Матки тяжелосупоростные	$t_R = 24,63 - 0,44 \cdot t_{\text{в}} \pm 1,35, ^\circ\text{C}$
Поросята-отъемыши	$t_R = 22,68 - 0,41 \cdot t_{\text{в}} \pm 1,23, ^\circ\text{C}$
Ремонтный молодняк	$t_R = 16,41 - 0,39 \cdot t_{\text{в}} \pm 0,8, ^\circ\text{C}$
Свиньи на откорме	$t_R = 18,23 - 0,43 \cdot t_{\text{в}} \pm 1,3, ^\circ\text{C}$

Опираясь на полученные уравнения радиационной температуры помещения t_R , $^\circ\text{C}$, изменяя параметры внутреннего воздуха $t_{\text{в}}$, $^\circ\text{C}$, можно получить такое сочетание t_R и $t_{\text{в}}$, при котором потребность в искусственном холоде будет минимальна. Решение полученных уравнений позволит понять, возможно ли совместное содержание разных групп животных.

Для определения требуемой тепловой мощности системы охлаждения необходимо разработать общую теплофизическую модель свиноводческого здания, учитывающую общестроительные, экономические и экологические аспекты, которая будет рассматривать здание как единую систему: «живой организм – микроклимат – тепловой контур – наружный воздух». Это необходимо для поддержания требуемых параметров микроклимата в помещении при постоянно изменяющихся параметрах наружного воздуха (температуры, $t_{\text{н}}$, $^\circ\text{C}$; относительной влажности $\phi_{\text{н}}$, %; влагосодержания $d_{\text{н}}$, г/кг сух. в-ха). Разработанная автором теплофизическая модель свиноводческого здания, учитывающая все вышеперечисленные требования, представлена на рис. 2.

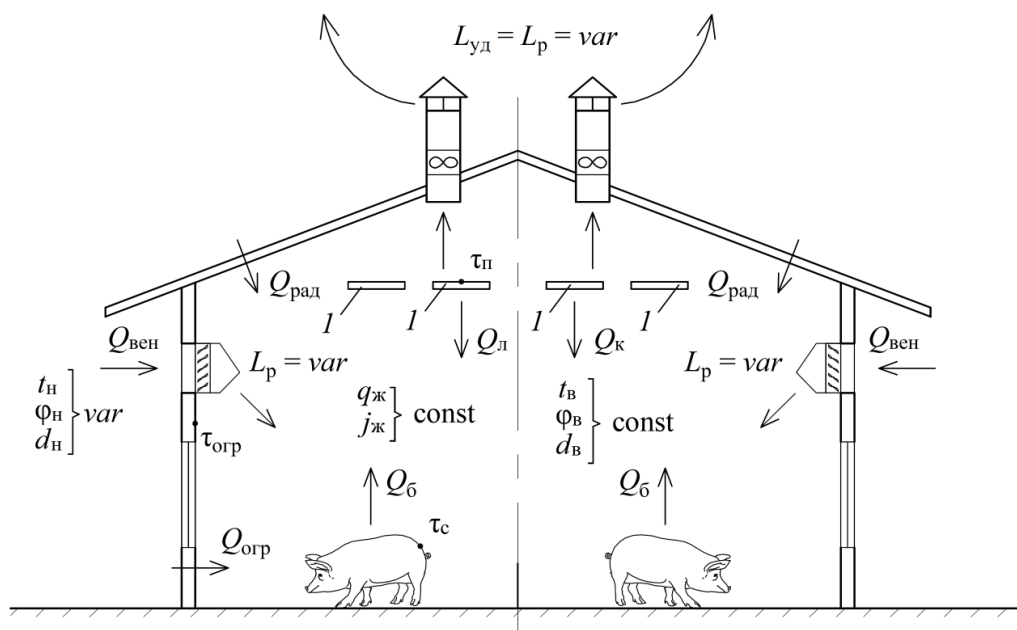


Рис. 2. Общая расчетная теплофизическая модель помещения содержания свиней при радиационном охлаждении: I – панели лучистого охлаждения

Уравнение теплового баланса в общем виде для свиноводческого производственного помещения с системой радиационного охлаждения можно записать:

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{б}} + Q_{\text{огр}} + Q_{\text{вент}} + Q_{\text{рад}}, \quad (6)$$

где $Q_{\text{п}}$ – суммарный тепловой поток от охлаждающей панели системы радиационного охлаждения, Вт, определяется по уравнению (7);

$Q_{\text{б}}$ – явные тепловыделения животных, Вт, которые определяются исходя из удельной явной теплоты, выделяемой одним животным $q_{\text{ж}}$, Вт/гол;

$Q_{\text{огр}}$ – поступление теплоты в помещение посредством теплопередачи, Вт (определяется по общепринятой методике [4]);

$Q_{\text{вен}}$ – поступление теплоты с приточным воздухом, Вт;

$Q_{\text{рад}}$ – количество теплоты, поступающей с солнечной радиацией, Вт.

Для поддержания расчетных параметров микроклимата (температуры внутреннего воздуха $t_{\text{в}}$, °С; относительной влажности $\phi_{\text{в}}$, %; влагосодержания $d_{\text{в}}$, г/кг сух. в-ха) расчетное количество приточного $L_{\text{р}}$ и удаляемого $L_{\text{уд}}$ воздуха определяется из необходимости ассимиляции влаги выделяющейся от животных $j_{\text{ж}}$, кг/ч.

Приведенное уравнение теплового баланса действительно только при температуре внутреннего воздуха $t_{\text{в}}$, °С, меньше температуры наружного воздуха $t_{\text{н}}$, °С. Ввиду значительного количества биологических тепловыделений возможна ситуация, когда $t_{\text{в}} > t_{\text{н}}$, °С, в этом случае трансмиссионные тепlopоступления $Q_{\text{огр}}$, Вт, становятся тепlopотерями здания, а система вентиляции начинает ассимилировать избытки теплоты.

Суммарный тепловой поток от охлаждающей панели $Q_{\text{п}}$, Вт, приведенный к 1 м² площади, определяется согласно уравнению (7), суммированием лучистой $Q_{\text{л}}$, Вт, и конвективной $Q_{\text{к}}$, Вт, составляющей теплообмена. Принцип действия



лучистого теплообмена радиационного охлаждения схож с системой лучистого отопления [5], основное отличие в том, что излучающими элементами становятся окружающие поверхности, а радиационная панель – поглотителем тепловой энергии.

При охлаждении потолочными панелями конвективные потоки меняют свое направление, за счет чего распределение температур происходит более равномерно:

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}} = \alpha_{\text{л}} \cdot (\tau_{\text{п}} - \tau_{\text{огр}}) + \alpha_{\text{к}} \cdot (\tau_{\text{п}} - t_{\text{в}}), \quad (7)$$

где $\tau_{\text{п}}$ – температура поверхности охлаждающей панели, °С;

$\tau_{\text{огр}}$ – средняя температура окружающих ограждений, участвующих в теплообмене без учета охлаждающей панели, °С;

$\alpha_{\text{л}}$, $\alpha_{\text{к}}$ – лучистый и конвективный коэффициенты теплообмена охлаждающей поверхности, соответственно, Вт/(м²·°С).

Перспективы применения систем радиационного охлаждения в свиноводческих зданиях достаточно широки, несмотря на жесткое ограничение их применения: высокая вероятность выпадения конденсата во влажном климате; при применении в климатических условиях с нормальным влажностным режимом значительно увеличивается требуемая площадь теплообменной поверхности.

Помимо поддержания комфортной для животных температурной обстановки помещения, радиационное охлаждение имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными воздушными системами охлаждения:

- воздушная среда прозрачна для теплового излучения, поэтому животное и охлаждающая панель находятся в непосредственном тепловом контакте, благодаря чему излучение проникает в мышечные ткани и в полной мере снимают перегрев;

- воздушные системы охлаждения значительно осушают воздух, что негативно воздействует на слизистую оболочку глаз, носа, горла. Снижается активность животных и пагубно отражается на здоровье;

- низкая тепловая инерция позволяет быстрее реагировать на изменение внешней температуры воздуха, что не допустит переохлаждения животных при резком похолодании.

Применение систем радиационного охлаждения позволит добиться следующих результатов:

- уменьшится расход кормов по отношению к набранной массе тела;
- улучшится качество выпускаемой мясной продукции;
- уменьшится процент падежа животных.

Системы радиационного охлаждения нуждаются в дальнейшем изучении и дополнительных испытаниях для создания расчетно-методической базы, необходимой для дальнейшего применения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баланин, В. И. Зоогигиенический контроль микроклимата в животноводческих и птицеводческих помещениях / В. И. Баланин. – Ленинград : Агропромиздат, 1988. – 144 с. – ISBN 5-10-000057-0. – Текст : непосредственный.

2. Колпаков, Г. В. Регулирование микроклимата в условиях летнего перегрева зданий / Г. В. Колпаков. – Москва : Стройиздат, 1970. – 175 с. – Текст : непосредственный.



3. Егиязаров, А. Г. Отопление и вентиляция зданий и сооружений сельскохозяйственных комплексов / А. Г. Егиязаров. – Москва : Стройиздат, 1981. – 239 с. – Текст : непосредственный.
4. Богословский, В. Н. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 частях. Част 1. Отопление / В. Н. Богословский, Б. А. Крупнов, А. Н. Сканави. – Москва : Стройиздат, 1990. – 344 с. – ISBN 5-274-01155-1. – Текст : непосредственный.
5. Смыков, А. А. Испытания лабораторной модели лучистой системы отопления на базе водяных инфракрасных излучателей / М. В. Бодров, А. А. Смыков. – Текст : непосредственный // Сантехника, Отопление, Кондиционирование (СОК). – 2023. – № 3. – С. 40–41.

RUIN Aleksey Evgenievich, postgraduate student, assistant of the chair of heating and ventilation

PROSPECTS FOR THE USE OF RADIATION COOLING SYSTEMS IN INDUSTRIAL PIG FARMS

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

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

Tel.: +7 (831) 430-54-85; fax: +7 (831) 430-19-36; e-mail: ruin199920@yandex.ru

Key words: radiation cooling, thermal radiation, refrigeration, thermophysics, energy saving, energy efficiency, cooling panel.

Statistical data on the amplitude of fluctuations in temperature and relative humidity of the outdoor air are presented. The most preferred climatic conditions for the use of radiation cooling are described. The dependences for determining temperature indifference for different age groups of animals are determined using the example of pigs. A general thermophysical model of a pig-breeding building has been developed for calculating radiation cooling.

REFERENCES

1. Balanin V. I. Zoogigienicheskiy kontrol mikroklimata v zhivotnovodcheskikh i pticevodcheskikh pomeshheniyakh [Zoohygienic control of the microclimate in livestock and poultry facilities]. Leningrad, Agropromizdat, 1988, 144 p.
2. Kolpakov G. V. Regulirovaniye mikroklimata v usloviyakh letnego peregreva zdaniy [Regulation of the microclimate in conditions of summer overheating of buildings]. Moscow, Stroyizdat, 1970, 175 p.
3. Egiazarov A. G. Otoplenie i ventilyaciya zdaniy i sooruzheniy selskokhozyaystvennykh kompleksov [Heating and ventilation of buildings and structures of agricultural complexes]. Moscow, Stroyizdat, 1981, 239 p.
4. Bogoslovskiy V. N., Krupnov B. A., Skanavi A.N. Vnutrenniye sanitarno-tekhnicheskiye ustroystva. Otopleniye. [Internal sanitary facilities. Heating.]. V 3 ch. Ch. 1. Moscow, Stroyizdat, 1990, 344 p.
5. Smykov A. A., Bodrov M. V. Ispytaniya laboratornoy modeli luchistoy sistemy otopleniya na baze vodyanykh infrakrasnykh izluchateley [Tests of a laboratory model of a radiant heating system based on water infrared radiators]. Santekhnika, Otoplenie, Konditsionirovanie [Plumbing, Heating, Air conditioning]. 2023, № 3, P. 40–41.

© А. Е. Руин, 2025

Получено: 06.04.2025 г.