

Применение систем газового лучистого отопления в свиноводческих комплексах

М. В. Бодров, д-р техн. наук, заведующий кафедрой отопления и вентиляции ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (ННГАСУ)

А. Е. Руин, аспирант, ассистент кафедры отопления и вентиляции ННГАСУ

А. А. Смыков, канд. техн. наук, доцент кафедры отопления и вентиляции ННГАСУ

Ключевые слова: свиноводческий комплекс, лучистое отопление, «светлые» и «темные» излучатели, энергоэффективность

Статья является продолжением серии публикаций, посвященных исследованию систем поддержания параметров микроклимата производственных сельскохозяйственных зданий (начало см. [1–3]). В данном материале приведены особенности создания энергоэффективных систем газового лучистого отопления в свиноводческих комплексах, а также условия эксплуатации «светлых» и «темных» инфракрасных излучателей [4].

Создание и поддержание требуемых технологических параметров микроклимата в свиноводческих предприятиях и комплексах переработки свинины является сложной и весьма специфической задачей. Нормативно установлены следующие значения температурно-влажностных показателей в холодный период года [5]:

- для взрослых свиней и свиноматок без поросят температура внутреннего воздуха в помещении находится в диапазоне $t_{в} = 13\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчетная температура принимается $t_{в} = +16\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- для глубокосупоросных свиноматок и свиноматок с поросятами температура внутреннего воздуха составляет $t_{в} = 18\text{--}22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчетная $t_{в} = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- для поросят-отъемышей температура внутреннего воздуха принимается в диапазоне $t_{в} = 22\text{--}28\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчетное значение $t_{в} = +24\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- для всех групп выращиваемых животных оптимальная относительная влажность составляет $\varphi_{в} = 60\text{--}80\text{ }%$ (допустимые максимальные значения не должны превышать $\varphi_{в} = 85\text{ }%$, т. к.

высокая влажность при низкой температуре внутреннего воздуха негативно влияет на здоровье свиней).

Опыт эксплуатации в свиноводческих комплексах конвективных или воздушных систем отопления показывает, что по высоте отапливаемого свиноводческого помещения наблюдаются градиенты температуры внутреннего воздуха, значения которых достигают $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$, что вызывает дополнительные потери теплоты в верхней зоне, особенно при наличии в здании фонарей, а также образование сосулек и обмерзание парапета кровли. Применение газовых систем лучистого отопления практически сводит к нулю указанные негативные факторы, что позволяет рассмотреть их применение в животноводческих зданиях при производстве свинины.

Воздействие инфракрасного радиационного облучения при использовании газового лучистого отопления весьма благоприятно сказывается на здоровье и продуктивности животных. Если тепловое излучение с длиной волны более 2 мкм

воспринимается в основном кожным покровом свиней и поросят, то излучение с длиной волны до 1,5 мкм проникает через поверхность кожи, частично нагревает ее, достигает кровеносных сосудов и непосредственно повышает температуру крови, вызывая комфортные тепловые ощущения. При таком лучистом отоплении большая часть избыточной теплоты передается конвекцией окружающему воздуху, имеющему более низкую температуру. Такая форма теплообмена действует освежающе и благоприятно на самочувствие свиней и поросят.

«Светлые» инфракрасные излучатели. «Светлая» горелка конструктивно состоит из рефлектора, который придает определенную направленность лучистому потоку теплоты и излучающей керамической насадке в виде керамической плитки из огнеупорной легковесной массы с сотнями цилиндрических отверстий диаметром 1–1,4 мм. Количество отверстий в плитке принимается из условия, чтобы их суммарное живое сечение составляло не менее 40 % площади плитки. Сгорание газозооной смеси происходит вблизи поверхности насадок при коэффициенте избытка воздуха $\alpha_{изб} = 1,05–1,1$, а температура поверхностей излучающих плиток находится в пределах $\tau_{пл} = 800–900\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ввиду того, что продукты сгорания природного газа имеют более высокую температуру, чем температура внутреннего воздуха в помещении свиноводческого комплекса $t_{в}$, область их концентрации находится в верхней зоне, откуда их необходимо и целесообразно удалять в атмосферу.

Расчетный воздухообмен в свиноводческом помещении $G_{св}$, кг/ч, определяют по формуле (1):

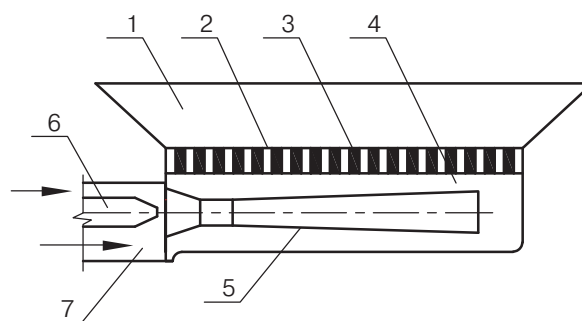
$$G_{св} = \frac{g_{CO_2}^{св} \cdot G_{CO_2}^r}{k_{уд} - k_{пр}}, \quad (1)$$

где $g_{CO_2}^{св}$ – количество CO_2 , поступавшее в обогреваемое помещение от свиней и подстилки, кг/ч;

n – количество содержащихся животных, гол.;

$G_{CO_2}^r$ – количество CO_2 , поступавшее в обогреваемое помещение с продуктами сгорания природного газа, кг/ч; $k_{уд}$ и $k_{пр}$ – допустимое массовое содержание CO_2 в воздухе помещения и наружном воздухе соответственно [6, 7].

Количество CO_2 , выделяемое с продуктами сгорания в «светлом» инфракрасном излучателе,



■ Рис. 1. Принципиальная схема беспламенной излучающей горелки: 1 – рефлектор; 2 – каналы в керамической насадке; 3 – насадка; 4 – распределительная коробка; 5 – инжектор-смеситель; 6 – патрубок для подачи природного газа; 7 – подача воздуха на горение

установленном в помещении свинарника, составляет:

$$G_{CO_2}^r = m \cdot G_r \quad (2)$$

где G_r – расход газа системой газового обогрева, кг/ч;

m – коэффициент, зависящий от химического состава сжигаемого газа: 2,27 – для природного газа; 2,98 – для пропана; 2,94 – для бутана.

Требуемое количество наружного воздуха $G_{н,CO_2}^{треб}$, кг/ч, для ассимиляции выделяющегося при горении газа углекислого газа, определяется по формуле (3):

$$G_{н,CO_2}^{треб} = \frac{G_{н,CO_2}^r}{\beta}, \quad (3)$$

$$G_{н,CO_2} = \frac{g_{CO_2}^* \cdot n + m \cdot G_r}{k_{уд} - k_{пр}}, \quad (4)$$

где β – коэффициент, показывающий повышение концентрации CO_2 в верхней зоне: при вытяжке из верхней зоны 30–50 % углекислого газа $\beta = 1,10–1,40$; при вытяжке из верхней зоны 70–100 % углекислого газа коэффициент β лежит в пределах $\beta = 1,16–1,20$.

Расчетное количество излучателей, необходимое к установке в помещении свинарника для поддержания теплового баланса, определяется по формуле:

$$n_{из} = 0,278 \cdot G_r \cdot \frac{Q_{н}^p}{Q_{изл}^{ном}}, \quad (5)$$

где $Q_{нр}$ – низшая расчетная теплотворная способность газа, кДж/кг;

$Q_{изл}^{ном}$ – номинальная тепловая мощность выбранной марки излучателя, Вт.

Инфракрасные излучатели должны размещаться в свиноводческих помещениях так, чтобы

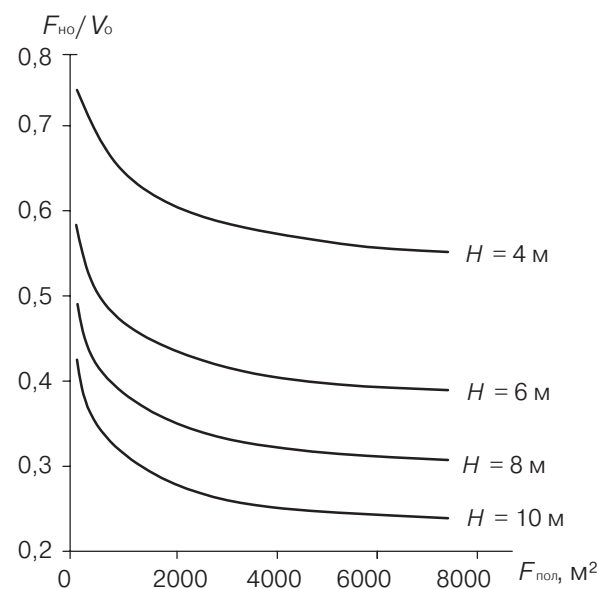
облученность животных не превышала следующие нормативные значения, Вт/м² (ккал/(м² · °С)):

- поросята возрастом до 30 суток – 170,4–204,5 (150–180);
- поросята возрастом более 30 суток – 113,6–170,4 (100–150);
- свиноматки – 90,8–113,6 (80–100).

Следует отметить, что, исходя из ветеринарно-гигиенических условий жизнедеятельности свиней вертикальное расстояние от расположения животного до горелки должно быть не менее 1,8 м.

При лучистом отоплении с использованием «светлых» излучателей происходит выгорание кислорода, а также образование окиси углерода и других крайне вредных веществ за счет выгорания пыли. Отметим, что на каждый киловатт мощности, развиваемый «светлым» излучателем, необходимо гарантированно подавать не менее 30 м³/ч атмосферного воздуха, что выполнить в достаточно герметизированных свиноводческих объектах весьма проблематично.

Проведенные ранее исследования показали, что использование «светлых» излучателей является эффективным при высоте помещения $H \leq 10$ м, а «темных» – $H \leq 5$ м. Однако данные ограничения нехарактерны для животноводческих зданий, имеющих высоту в коньке не более 5–6 м. Проведенный анализ, результаты которого представлены на рис. 2, показал, что в рассматриваемом диапазоне высот помещений свиноводческих объектов площадь наружных ограждений $F_{\text{но}}, \text{м}^2$,



■ Рис. 2. К вопросу определения оптимальных объемно-планировочных решений свиноводческих помещений при использовании лучистого отопления

а следовательно, и роль ограждающих конструкций в качестве вторичного источника тепловыделений по сравнению с общим объемом помещения $V_o, \text{м}^3$, сохраняется существенной только при сравнительно небольшой площади пола $F_{\text{пол}}, \text{м}^2$.

Лучистый теплообмен в животноводческих комплексах характеризуется следующими основными физическими показателями:

- средней радиационной температурой $t_R, ^\circ\text{C}$, равной температуре абсолютно черного тела, с которой происходил бы лучистый теплообмен, эквивалентный имеющему место в реальной обстановке;
- температурой внутреннего воздуха $t_b, ^\circ\text{C}$;
- оперативной температурой $t_o, ^\circ\text{C}$, равной температуре абсолютно черного тела, с которой происходил бы суммарный лучистый и конвективный теплообмен, эквивалентный имеющему место в реальной обстановке;
- эффективным лучистым потоком $q, \text{Вт/м}^2$, воздействующим на выращиваемое животное (взрослые свиньи, поросята и др.).

При известных значениях коэффициентов лучистого α_l и конвективного α_k теплообмена соотношения между указанными показателями имеют вид:

$$q = \alpha_l \cdot (t_R - t_b); \quad q = (\alpha_l + \alpha_k) \cdot (t_o - t_b); \quad (6)$$

$$t_R = \frac{q}{\alpha_l}; \quad t_o = t_b + \frac{q}{\alpha_l + \alpha_k}; \quad (7)$$

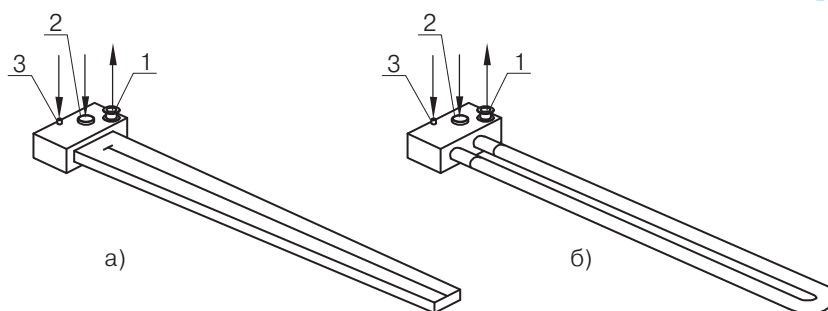
$$t_R = t_b + \frac{(\alpha_l + \alpha_k) \cdot (t_o - t_b)}{\alpha_l} \quad (8)$$

Анализ зависимостей (6)–(8) позволяет сделать вывод, что увеличение температуры внутренних поверхностей ограждающих конструкций за счет лучистого фактора вызывает повышение потерь теплоты за счет их теплопроводности, вследствие чего экономия расходуемой на подогрев воздуха энергии теряется из-за интенсификации теплопроводности.

В конечном итоге количественно энергетический баланс определяется расчетными значениями радиационной (лучистой) и конвективной составляющих теплоотдачи:

$$\alpha_l = f_{\text{eff}} \cdot 4 \cdot \sigma \cdot \left(\frac{t_R + t_b}{2} + 273 \right)^3; \quad \alpha_k = 0,107 \cdot v^{0,5}, \quad (9)$$

где f_{eff} – отношение поверхности тела животного, подверженного радиационному воздействию, к общей поверхности; σ – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м² · К⁴); v – средневзвешенная подвижность воздуха в свиарнике, м/с.



■ Рис. 3. «Темные» инфракрасные излучатели: а – прямой модуль; б – U-образный модуль; 1 – патрубок, отводящий дымовые газы; 2 – патрубок приточного воздуха; 3 – патрубок подвода природного газа

Авторами сделан важный вывод, что роль радиационного фактора существенным образом зависит как от конструкции и типа излучателей, так и от общей подвижности воздуха в помещении.

Для «темных» излучателей с длиной волны излучения около 10 мкм наряду с лучистой составляющей существенным является конвективный теплообмен, что в конечном итоге приводит к ухудшению условий обогрева, свойственного размещению нагревателей конвективного типа в верхней зоне обогреваемого помещения. Расположенные под потолком источники теплоты, конвективная составляющая которых доходит до 30 %, непреднамеренно увеличивают вертикальный градиент температуры по сравнению с естественным. При наличии в свиноводческих зданиях больших остекленных фонарей, а также недостаточной тепловой изоляции покрытия значения теплопотерь в верхней зоне могут достигать 50 % от общих потерь теплоты зданием и их компенсация должна осуществляться потолочными излучателями за счет их конвективной теплоотдачи [8].

Неоднородность формируемых температурных полей является характерной особенностью при устройстве систем лучистого отопления в животноводческих зданиях. Там могут создаваться зоны «затенения», условия прогрева которых резко отличаются от общего объема здания, что приводит к негативному явлению температурных контрастов и создает угрозу содержащимся свиньям и пороссятам.

«Темные» инфракрасные излучатели. Модули «темных» инфракрасных излучателей конструктивно представлены прямооточной (рис. 3а) и U-образной формой (рис. 3б); диапазон максимальной температуры на поверхности колеблется в пределах 290–450 °С; длина излучателя может быть 36 м и более, а единичная мощность – до 300 кВт.

Требуемое количество «темных» инфракрасных излучателей n , шт, определяется по зависимости:

$$n = \frac{Q_{от}}{\eta_{изл} \cdot Q_{изл}^{ном}}, \quad (10)$$

где $Q_{от}$ – требуемая тепловая мощность свиноводческого помещения, Вт;

$\eta_{изл}$ – коэффициент полезного действия излучателя.

Подбор излучателей для обогрева животноводческих помещений проводится по техническим данным горелок и их лучистым характеристикам. При этом максимальное значение интенсивности облучения для заданной высоты подвеса и угла наклона горелок не должно превышать допустимой интенсивности облучения.

Конечное значение плотности лучистого потока (поверхностной плотности облучения) $q_{изл}$, Вт/м², имеет вид:

$$q_{изл} = c_{пр} \cdot \frac{a \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot h^2} \cdot \left(\frac{T_{изл}}{100} \right)^4, \quad (11)$$

где $c_{пр}$ – приведенный коэффициент излучения, учитывающий угловые коэффициенты облученности систем серых тел, Вт/(м²·К⁴);

a, b – стороны условно прямоугольного излучателя, м;

h – расстояние по нормали от излучателя до пола, м; $T_{изл}$ – средняя температура поверхности излучателя, К.

Расчет облученности пола свиноводческого помещения ведется путем разбития излучателя на условно равные зоны в количестве m , шт, а истинная температура $T_{ср}$ по зонам определяется из равенства:

$$\left(\frac{T_{ср}}{100} \right)^4 = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m \left(\frac{T_i}{100} \right)^4. \quad (12)$$

Максимальная поверхностная плотность (под центром излучателя) $q_{изл}^{max}$, Вт/м², определяется по формуле:

$$q_{изл}^{max} = 0,9 \cdot q_{изл}, \quad (13)$$

где 0,9 – коэффициент, показывающий, что 10 % лучистого потока теряется через поверхность ограждения.

Суммируя поверхностную плотность облучения l рядом расположенных «темных» инфракрасных излучателей, получаем общую поверхностную плотность излучения $q_{\text{изл}}^{\text{общ}}$, Вт/м²:

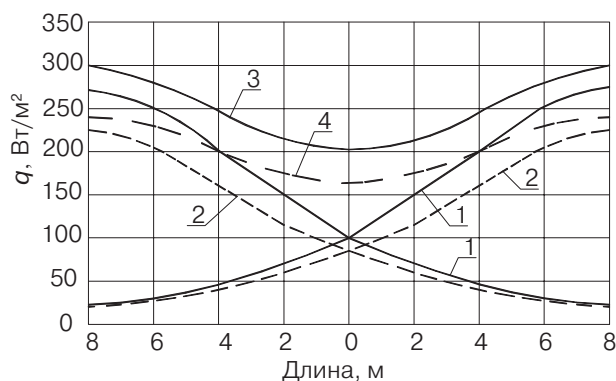
$$q_{\text{изл}}^{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n q_{\text{изл}}^i \quad (14)$$

Расчетные параметры микроклимата в свиноводческих комплексах обеспечиваются следующим образом. При обогреве излучением внутренних поверхностей ограждений стремление достичь равномерной раздачи теплоты влечет за собой манипуляцию интервалами и дистанциями таким образом, чтобы восполнить недостаточность прямого излучения следующего излучателя или отраженного излучения. Кроме того, отметим немаловажный фактор, что температура самого «темного» излучателя изменяется по длине из-за остывания уходящих газов.

На рис. 4 авторами приведена эпюра суммарной поверхностной плотности облучения между двумя соседними «темными» излучателями, полученная суммированием поверхностных плотностей облучения в каждом сечении обогреваемого пола. Можно однозначно отметить, что излучатели U-образной формы более эффективны, чем прямооточные, по равномерности обогрева пола свиноводческого комплекса.

Облученность поверхности пола вдоль прямооточного излучателя имеет высокую неравномерность (до 10 раз), у излучателей U-образной – не более четырех раз. Эпюра облученности поверхности пола между двумя излучателями характеризуется более высокими показателями для U-образных излучателей.

В качестве заключения по проведенным исследованиям авторы отмечают, что значения средней облученности, например в свиноматочнике, составляют в среднем по станку 140–160 Вт/м², вполне достаточны для комфортного отопления, т. к. физиологически комфортная температура восприятия (+10–12 °С) обеспечивается при поверхностной облученности 80–85 Вт/м². Данный факт поддерживается полным ветеринарно-технологическим циклом выращивания свиней и благоприятными микроклиматическими условиями для обслуживающего персонала [9, 10]. Максимальная интенсивность облучения 160–280 Вт/м² должна поддерживаться только на небольшой части площадки свиноматочника: места содержания новорожденных поросят и молодняка.



■ Рис. 4. Эпюры облучения поверхности пола между излучателями: 1 – одиночный U-образный излучатель; 2 – прямооточный одиночный излучатель; 3 – суммарная поверхностная плотность двух U-образных излучателей; 4 – суммарная поверхностная плотность двух прямооточных излучателей

Литература

1. Бодров М. В., Морозов М. С. и др. Повышение энергоэффективности и эксплуатационной надежности систем обеспечения параметров микроклимата животноводческих зданий и сооружений // АВОК. – 2022. – № 6. – С. 38–42.
2. Бодров М. В., Руин А. Е. и др. Расчет воздушно-теплого баланса животноводческих помещений // АВОК. – 2023. – № 6. – С. 28–31.
3. Бодров М. В. Создание энергоэффективных вентиляционных систем в помещениях птицефабрик // АВОК. – 2024. – № 1. – С. 20–24.
4. Стандарт СТО НП «АВОК» 4.1.5-2006 «Системы отопления и обогрева с газовыми инфракрасными излучателями». – М.: АВОК-ПРЕСС, 2007
5. НТП-АПК 1.10.02.001-00 «Нормы технологического проектирования свиноводческих ферм крестьянских хозяйств».
6. Егиязаров А. Г. Отопление и вентиляция зданий и сооружений сельскохозяйственных комплексов. – М.: Стройиздат, 1981.
7. Родин А. К. Газовое лучистое отопление. – Л.: Недра, 1987.
8. Богословский В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). – М.: Высшая школа, 1982.
9. Бодров В. И., Бодров М. В. и др. Микроклимат производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2008.
10. Бодров М. В. Отопление и вентиляция животноводческих и птицеводческих зданий. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2012.

elco

heating
solutions



Высокоэффективные газовые премиксные котлы

60 - 2000 кВт