DOI 10.33952/2542-0720-2020-2-22-97-106
УДК 631.223.5: 628.8

Петунина И. А., Коновалова О. В.

ЕСТЕСТВЕННЫЙ КОНВЕКТИВНЫЙ ПОТОК У ТЕЛА ПТИЦЫ КАК ИСТОЧНИК ТЕПЛА

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина»

Реферат. *Для создания оптимальных условий микроклимата в животноводческих помещениях важным направлением является разработка и внедрение энергосберегающего оборудования с использованием тепла, выделяемого животными в процессе жизнедеятельности. Теоретическое исследование теплообмена между телом птицы и окружающей средой проводили для решения задач разработки систем микроклимата и выбора рациональной схемы циркуляции, а также утилизации тепла. Цель исследований – теоретическое решение вопроса теплоизлучения птицы с определением скорости, температуры и теплового потока у тела птицы различного возраста. Настоящие исследования тепловыделений птицей проводили в 2014–2019 гг. на базе лабораторий кафедры механизации животноводства и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина» и на базе учебного хозяйства «Кубань» КубГАУ. В опыте использовали 10 голов бройлеров, массой от 0,08 до 2,00 кг, возрастом от 0 до 140 дней. Материалом исследований были тепловыделения бройлеров птицефермы учебно-опытного хозяйства «Кубань». Предметом исследования являлись теоретические данные конвективного теплопереноса. За основу были приняты стандартные методики математического анализа и моделирования с учетом используемого оборудования и объектов. В лабораторных условиях проводили биометрические обмеры молодняка птицы перед каждым исследованием. Измеряли такие показатели как рост, объем, длина, масса и температура тела. В результате проведенных теоретических исследований получены значения скоростей, температурных и тепловых потоков. Анализ результатов закономерностей излучения птицей тепла позволил установить, что скорость возрастала от 1,25 до 1,67 м/с, температура изменялась от 38,5 до 29 °С, а воздушный поток увеличивался от 0,00025 до 0,00100 м^3.*

Ключевые слова: *тело птицы, конвективный поток, турбулентный пристенный слой, избыточное тепло, теплоотдача, скорость потока.*

Введение

Изучение конвективного теплопереноса имеет всю большую значимость при моделировании и оптимизации физических процессов, связанных с применением альтернативной энергии. Вскоре встанет острый вопрос о переходе с привычных нам источников энергии на альтернативные. Конвективный теплоперенос играет важную роль в природе и в разных отраслях техники. От масштабов изучения естественной конвекции зависит дальнейшее развитие техники. Температурные, скоростные и массообменные процессы, а соответственно и их поля, возникающие в условиях неравномерного взаимодействия с внешней средой, представляют существенный теоретический и практический интерес. Вопросы теплопроводности и массопереноса всегда представляли и представляют интерес для экономики. При этом в связи с совершенствованием технологий и технических средств, развитием современных материалов, используемых для различных целей, значительно повышаются требования к точности определения температур и массообменных процессов. Роль точных аналитических методов решения краевых задач, в ряде случаев позволяющих

представить общее решение в удобном виде, представляет практический интерес для оценки возможности использования теплового потока от источников тепла в целях экономии топливно-энергетических ресурсов и снижения себестоимости продукции. Особенно это относится к тепловым задачам обобщенного типа, когда классические аналитические методы математической физики становятся неприменимыми. Это требует, с одной стороны, усовершенствования и модификации существующего математического аппарата, а с другой стороны, развития новых методов. Одним из эффективных методов решения линейных задач является метод понижения размерности тепловой задачи. Моделирование процессов переноса на основе простой одномерной математической модели актуально и при использовании вычислительной техники дает практическое решение поставленных задач [1–5].

Цель исследования – найти теоретическое решение задач по установлению и использованию закономерностей теплоизлучения для различных видов тел птиц при решении задач создания микроклимата в помещениях в зависимости от способа их содержания.

Материалы и методы исследований

Настоящие исследования тепловыделений птицей проводили в 2014–2019 гг. на базе лабораторий кафедры механизации животноводства и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина».

Материалом исследований были тепловыделения бройлеров птицефермы учебно-опытного хозяйства «Кубань». В опыте использовали 10 голов бройлеров массой от 0,08 до 2,00 кг, возрастом от 0 до 140 дней.

Предметом исследования являлись теоретические данные конвективного теплопереноса.

В основе теоретического решения воздушных потоков лежит теория затопленных свободных турбулентных струй. Принято считать струю свободной, если она не ограничена твердыми стенками и распространяется в пространстве, заполненном той же жидкостью. Струя постоянно расширяется и рассеивается в окружающей жидкости под действием сил трения, возникающих на границе струи и жидкости. Обмен импульсов между струей и окружающей жидкостью уменьшает скорость струи, увеличивает ее массу и площадь поперечного сечения.

Теоретические исследования выполнены с использованием классических положений термодинамики и теплотехники, математического анализа.

Экспериментальные исследования выполняли в производственных и лабораторных условиях с применением стандартных и частных методик [1, 4].

В лабораторных условиях проводили биометрические обмеры молодняка птицы перед каждым исследованием. Измеряли такие показатели как рост, объем, длину, массу и температуру тела. Для выполнения этой работы изготовили специальный бокс с изменяемыми параметрами и фиксацией птицы, что позволяло свободно без помех проводить промеры. Для измерения температур использовали координатные рамки, расположенные перпендикулярно одна относительно другой, с сеткой с ячейками через 10 мм на боксе вдоль и поперек. Промеры по всем указанным параметрам проводили в возрасте до 10 дней каждый день, а в дальнейшем – через каждые пять дней от 11 до 12 часов дня. При этом фиксировали состояние параметров окружающего пространства и параметры помещений, находящихся снаружи. Для измерения показаний температурных полей и подвижности использовали термоанемометр «TESTO», который позволял измерять температуры в пределах от 40 °С до 50 °С с ошибкой ±0,5 %, а также подвижность воздуха от 0 до 5 м/с с ошибкой ±0,5 %.

Для обработки результатов исследований использовали программное обеспечение MathCad.

При изопотенциальном процессе переноса тепла в пределах поверхности шарообразного тела изменение потенциала переносимого агента может быть представлено уравнением в трехмерных Декартовых координатах и в условиях нестационарного теплопереноса представляет определенные трудности [6].

Если принять поверхности как изопотенциальные, то в этом случае задача преобразуется в уравнение в частных производных. Однако возникает проблема в получении регулярной аналитической зависимости [7].

У поверхности тела птицы образуется регулярный поток свободной конвекции, который турбулизируется и утолщается по мере распространения вверх. Примем форму тела птицы как шар с постоянной температурой поверхности.

Рассмотрим более общую задачу – конвективный поток у шарообразного источника тепла произвольного радиуса *R*. Тогда при $R \to \infty$ имеем случай конвективной струи у плоской стенки.

Схема явления рассматривается как конвективный поток, состоящий из четырех слоев: тонкой пленки неподвижного воздуха с температурой, равной температуре стенки; ламинарного подслоя, где скорость резко возрастает, а температура снижается; турбулентного пристенного слоя, в котором происходит дальнейшее возрастание скорости (до максимального значения в каждом поперечном сечении) и дальнейшее снижение температуры воздуха; и, наконец, внешнего вихревого слоя свободной турбулентности, где скорость уменьшается от максимума до нуля, а температура – до температуры окружающей среды. Схема распределения скоростей и температур в поперечном сечении конвективного потока, возникающего у нагретого шара, представлена на рисунке 1.

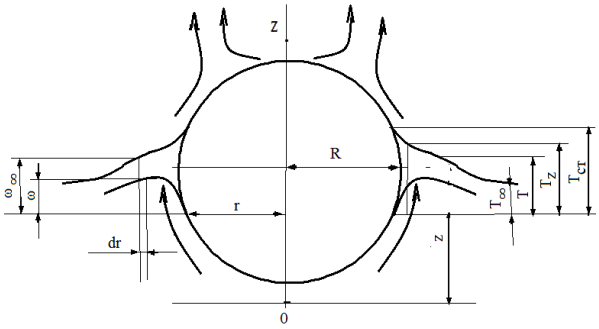

Рисунок 1 – Схема распределения скоростей и избыточных температур в поперечном сечении конвективного потока, возникающего вокруг нагретого шара

Результаты и их обсуждение

Поскольку толщина внешнего турбулентного слоя несравненно больше толщины трех прилегающих к источнику тепла слоев воздуха и наличие стенки не оказывает влияния на развитие этой части потока, то приближенно весь конвективный поток можно представить состоящим только из вихревого слоя свободной турбулентности.

Предлагаемое аналитическое решение справедливо только для этой основной части конвективного потока. Исходными являются уравнения импульса сил и количества избыточного тепла в струе. Предполагается, что теплоотдача с единицы площади теплой поверхности постоянна по высоте шара.

Количество тепла Q_z, переходящего от поверхности к воздуху для уровня *z*, равно количеству тепла Q_z, переносимого потоком через данное поперечное сечение, то есть:

$$q 2\pi R z = c_p \int_F \gamma \varpi \vartheta df \ . \qquad (1)$$

Приращение количества движения в струе вызывается архимедовой подъемной силой. Поскольку приращение количества движения равно приращению импульса силы $dK_z = dl_z$,то для секундной массы воздуха можно записать

$$d\int_F \frac{\gamma_\infty}{g}\varpi^2 df = \left[\int_F (\gamma_\infty - \gamma) df\right] dz. \qquad (2)$$

Уравнения (1) и (2) образуют систему с двумя неизвестными: ϖ и ϑ – скоростью и избыточной температурой воздуха в произвольной точке потока на рассматриваемом уровне, причем $\vartheta = T - T_\infty$, где T_∞ – температура окружающей среды.

Приняли следующие обозначения:

R – радиус источника тепла;

z – уровень рассматриваемого поперечного сечения конвективного потока, отсчитываемый от низа греющей поверхности;

$q = \frac{\alpha \vartheta_{ct}}{3600}$ – секундная теплоотдача единицы площади греющей поверхности, Вт/м^2;

α — коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/м^2·К;

$\vartheta_{ct} = T_{xt} - T\infty$ – превышение температуры стенки T_{cm} над температурой окружающей среды;

c_p и γ_∞ – соответственно теплоемкость и удельный вес не нагретого воздуха;

$df = 2nrdr$ – элементарная площадь поперечного сечения потока;

z – расстояние от оси шара до произвольной точки.

Аналитическое выражение профиля скорости в поперечных сечениях конвективного потока приняли по Райхардту [8]

$$\varpi = \varpi_z e^{-\frac{1}{2}\lambda^2}. \qquad (3)$$

Изменение избыточных температур описывается уравнением

$$\vartheta = \vartheta_z e^{-\frac{1}{2n}\lambda^2}, \qquad (4)$$

где ϖ_z – максимальная скорость потока на рассматриваемом уровне;

$\vartheta_z = T_z - T_\infty$ – температура воздуха в точке, где скорость имеет максимум;

$\lambda = \frac{r - R}{cz}$ – координата произвольной точки;

$r - R$ – расстояние по радиусу от стенки цилиндра до произвольной точки потока;

c – экспериментальная постоянная турбулентности;

n – вторая экспериментальная постоянная, являющаяся мерой тепловой турбулентности.

Подставив значения ϖ, ϑ и df в уравнение (1), получили:

$$q = 2\pi Rz = 2\pi c_p \int_0^\infty \gamma \varpi_z \vartheta_z e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r-R}{cz}\right)^2\left(1+\frac{1}{n}\right)} r dr$$

или

$$qRz = c_p \int_0^\infty \gamma \varpi_z \vartheta_z e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r-R}{cz}\right)^2\left(1+\frac{1}{n}\right)} (r - R + R) d(r - R)$$

Считая удельный вес воздуха y постоянным, проинтегрировали последнее уравнение с учетом того, что интеграл типа Эйлера–Пуассона в пределах от нуля до бесконечности равен

$$\int_0^\infty e^{-\alpha(r-R)^2} d(r-R) = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{\alpha}},$$

$$qRz = cc_p\varpi_\infty\varpi_z\vartheta_z\left(\frac{nc}{n+1}ze^{-\frac{(n+1)R^2}{2nc^2z^2}} + R\sqrt{\frac{\pi n}{2(n+1)}}\right).$$

Преобразовав относительно произведения ϖ_z, ϑ_z и сократив подобные члены, получили первое уравнение, связывающее характерные температуру и скорость конвективного потока

$$\varpi_z\rho_z = \frac{qR}{cc_p\gamma_\infty\left(\frac{nc}{n+1}ze^{-\frac{(n+1)R^2}{2nc^2z^2}} + R\sqrt{\frac{\pi n}{2(n+1)}}\right)}. \quad (5)$$

Второе необходимое уравнение нашли на основании теоремы о количестве движения.

Приращение количества движения секундной массы потока определили при помощи ранее сделанных предпосылок

$$dK_z = 2\pi n d\int_R^\infty \frac{\gamma}{g}\varpi_z^2 e^{-\left(\frac{r-R}{cz}\right)^2} rdr = c\pi\frac{\gamma_\infty}{g}d\left[\varpi_z^2 z\left(cze^{-\frac{R^2}{c^2z^2}} + R\sqrt{\pi}\right)\right]. \quad (6)$$

Подъемная сила, действующая на элементарный слой потока толщиной *dz*

$$dI_z = \left[2\pi\int_R^\infty(\gamma_\infty - \gamma)rdr\right]dz$$

с учетом равенства

$$\frac{\gamma_\infty - \gamma}{\gamma} = \frac{T - T_\infty}{T_\infty}$$

может быть представлена как

$$dI_z = \frac{\gamma_\infty}{T_\infty}\left(2\pi\int_R^\infty \vartheta rdr\right)dz.$$

Подставив значение ϑ из формулы (5), посредством интегрирования нашли значение элементарной подъемной силы

$$dI_z = 2\pi c\frac{\gamma_\infty}{T_\infty}\vartheta_z z\left(ncze^{-\frac{R^2}{2nc^2z^2}} + R\sqrt{\frac{\pi n}{2}}\right)dz. \quad (7)$$

Зная dK_z и dI_z, можно определить ϖ_z двумя путями. Первый – приравнять правые части выражений (6) и (7), и, подставив ϑ_z из равенства (5), решить полученное дифференциальное уравнение относительно ϖ_z. Второй путь, более простой в смысле математических преобразований, изложен ниже.

Интегрируем выражение (6)

$$K_z = c\pi\frac{\gamma_\infty}{g}\varpi_z^2 z\left(cze^{-\frac{R^2}{c^2z^2}} + R\sqrt{\pi}\right) + C. \quad (8)$$

Произвольная постоянная C = 0, так как при z = 0 значение $C_z = 0$.

Выразили ϖ_z из уравнения (8)

$$\varpi_z = \sqrt{\frac{R_z}{c\pi \frac{\gamma_\infty}{g} z\left(cze^{-\frac{R^2}{c^2z^2}} + R\sqrt{\pi}\right)}} \quad . \tag{9}$$

Определить неизвестное СK_z можно, решив относительно K_z дифференциальное уравнение (7), предварительно заменив в нем dI_z на dK_z и подставив значения ϑ_z из (5) и ϖ_z из уравнения (9)

$$dK_z = 2\pi\sqrt{c\pi}\,\frac{\sqrt{\gamma_\infty}}{T_\infty c_p\sqrt{g}}\,qR\,\frac{\sqrt{cze^{-\frac{R^2}{c^2z^2}} + R\sqrt{\pi}\left(ncze^{-\frac{R^2}{2nc^2z^2}} + R\sqrt{\frac{\pi n}{2}}\right)z\sqrt{z}}}{\sqrt{K_z\left(\frac{nc}{n+1}ze^{-\frac{(n+1)R^2}{2nc_2z^2}} + R\sqrt{\frac{\pi n}{2(n+1)}}\right)}} \,. \tag{10}$$

При этом, подынтегральное выражение, обозначенное через $\Phi(z)$, в элементарных функциях не интегрируется.

Подставив значение K_z в уравнение (9), получили уравнение для максимальной скорости конвективного потока ϖ_z в произвольном сечении

$$\varpi_z = \sqrt[3]{\frac{3}{c}}\cdot\sqrt[3]{\frac{g}{c_p\gamma_\infty T_\infty}qR}\cdot\sqrt[3]{\frac{\int\Phi(z)dz}{\sqrt{z^3\left(cze^{-\frac{R^2}{c^2z^2}} + R\sqrt{\pi}\right)^3}}} \quad . \tag{11}$$

Последний сомножитель (подкоренное выражение), величина которого зависит от значения R и является функцией z, обозначили A_z.

Выразив ϖ_z из уравнения (5), нашли значение избыточной температуры $\vartheta_{z\,г}$ в точке, где скорость имеет максимум

$$\vartheta_z = \sqrt[3]{\frac{1}{3c^2}}\cdot\sqrt[3]{\frac{T_\infty}{gc_p^2}q^2R^2}\cdot\frac{B_z}{\sqrt[3]{A_z}}\,, \tag{12}$$

где

$$B_z = \frac{1}{\frac{nc}{n+c}ze^{-\frac{(n+1)R^2}{2nc^2z^2}} + R\sqrt{\frac{\pi n}{2(n+1)}}}.$$

Зная максимальные значения скорости и температуры в сечении z, можно найти значения ϖ и ϑ в произвольной точке данного сечения по формулам (3) и (4):

$$\varpi = \sqrt[3]{\frac{3}{c}}\cdot\sqrt[3]{\frac{g}{c_p\gamma_\infty T\infty}qR}\cdot\sqrt[3]{A_z}\cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r-R}{cz}\right)^2}\,, \tag{13}$$

$$\vartheta = \sqrt[3]{\frac{1}{3c^2}}\cdot\sqrt[3]{\frac{T_\infty}{gc_p^2\gamma_\infty^2}g^2R^2}\cdot\frac{B_z}{\sqrt[3]{A_z}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r-R}{cz}\right)}. \tag{14}$$

Секундное количество воздуха, перемещаемого через поперечное сечение потока на уровне z, определяется интегралом

$$L_z = 2\pi \int_R^{\infty} \varpi r dr .$$

Подставив значение ϖ из уравнения (13) и проинтегрировав, получили

$$L_z = 2\pi \sqrt[3]{3c^2} \cdot \sqrt[3]{\frac{g}{c_p \gamma_\infty T_\infty} qRz^3} \cdot \sqrt[3]{A_z D_z}, \qquad (15)$$

где

$$D_z = cze^{-\frac{R^2}{c^2 z^2}} + R\sqrt{\frac{\pi}{2}}.$$

Поскольку величина A_z, входящая в формулы для определения всех параметров конвективного потока, содержит не берущийся интеграл $\Phi(z)$, для решения в общем случае необходимо произвести приближенное интегрирование.

Для частных случаев при $R \to \infty$ и $R \to 0$ интеграл $\Phi(z)$ можно найти точно. Мы проанализировали эти случаи.

При $R \to \infty$ (случай плоской стенки)

$$\int \Phi(z) \to \sqrt{n+1} \cdot \int z^{\frac{3}{2}} dz = \frac{2}{5}\sqrt{n+1} \cdot z^{\frac{3}{2}}.$$

Множители A_z, B_z и D_z принимают значения:

$$A_z = \frac{2\sqrt{n+1}}{5R\sqrt{\pi}}; \qquad B_z = \frac{\sqrt{2(n+1)}}{R\sqrt{\pi n}}; \qquad D_z = \frac{R\sqrt{\pi}}{2}.$$

Тогда расчетные формулы для скорости, избыточной температуры и расхода воздушного потока в случае плоской стенки имеют вид:

$$\varpi_z = \sqrt[3]{\frac{6\sqrt{n+1}}{5c\sqrt{\pi}}} \cdot \sqrt[3]{\frac{g}{c_p \gamma_\infty T_\infty} qz}; \qquad (16)$$

$$\vartheta_z = \sqrt[3]{\frac{5\sqrt{2}(n+1)}{3c^2 \pi n \sqrt{n}}} \cdot \sqrt[3]{\frac{T\infty}{g c_p^2 \gamma_\infty^2} \cdot \frac{q^2}{z}}; \qquad (17)$$

$$L_z = \sqrt[3]{\frac{3c^2 \pi \sqrt{n+1}}{5\sqrt{2}}} \cdot 2\pi R \sqrt[3]{\frac{g}{c_p \gamma_\infty T_\infty} qz^4}. \qquad (18)$$

Для оценки полученных закономерностей (уравнения 16, 17, 18) проведены аналитические исследования, результаты которых представлены графиками (рисунки 2, 3, 4). На них представлены скорости, температурные и массовые потоки в зависимости от возраста птицы. Приняты бройлеры от первого дня до товарного возраста.

Анализ проводили с учетом результатов бонитировки птицы. Радиус тела от 1 дня до промышленного возраста – 140 дней от R = 0,05 м до R = 0,125 м; высота расположения максимального диаметра тела на уровне z = 0,125 м; температура тела θ = 41 °С; коэффициент постоянной турбулентности c = 0,033; мера тепловой турбулентности n = 0,495.

Анализ рисунка 2, построенного с использованием уравнения (16), дает основание сделать вывод о том, что скоростной поток по мере увеличении массы птицы, а, следовательно, и размеров тела, приводит к увеличению от 0,35 до 0,47 м/с кривая (1).

Эмпирическая кривая (2) представленная на рисунке (2) подтверждает изменения температурных полей вокруг тела птицы. В производственных условиях поля изменяются от 0,32 до 0,45 м/с, что очень хорошо прослеживается на графике (рисунок 2). При этом необходимо заметить, что скорость по мере увеличения массы тела птицы несколько замедляется.

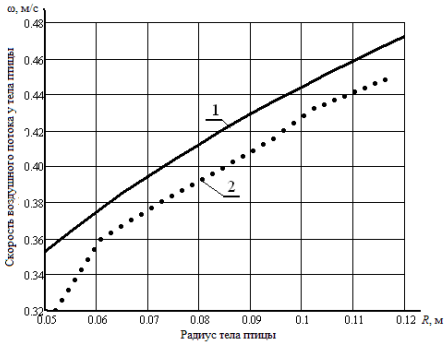

Рисунок 2 – Зависимость максимальной скорости ω потока у тела птицы от радиуса тела *R*

Примечание. *1 – теоретическая кривая; 2 – эмпирическая кривая.*

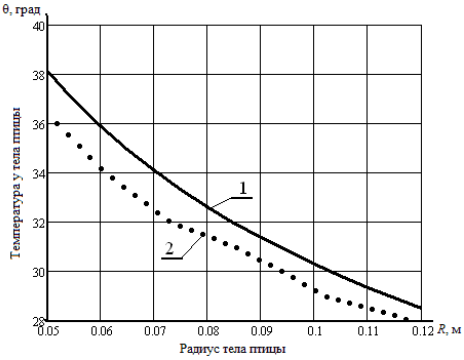

Рисунок 3 – Зависимость избыточного температурного потока θ у тела птицы от радиуса тела *R*

Примечание. *1 – теоретическая кривая; 2 – эмпирическая кривая.*

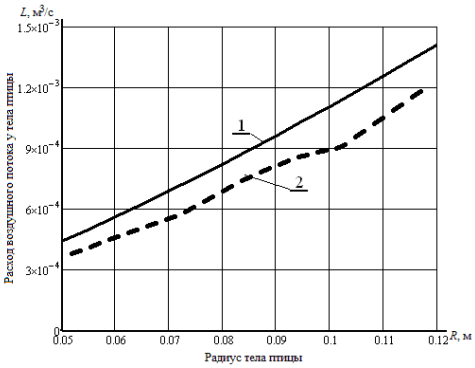

Рисунок 4 – Зависимость конвективного потока *L* у тела птицы от уровня расположения исследуемого слоя потока *z*

Примечание. *1 – теоретическая кривая; 2 – эмпирическая кривая.*

Изменение температурных полей, представленное на рисунке 3, (построенному по уравнению (17)), дает основание заметить, что температурные потоки с увеличением массы тела птицы несколько снижаются в ламинарном слое от 38,5 до 29 градусов, что ведет к возрастанию скорости непосредственно у тела птицы и массы воздушного потока. Экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими значениями и лежат в пределах от 36 до 28 градусов (кривая 2).

Расход воздуха в конвективном потоке (рисунок 4) по закономерности (18) возрастает по мере роста птицы от $4{,}5\times10^{-4}$ до $1{,}4\times10^{-3}$ м^3/с. Экспериментальные данные расхода воздуха у тела птицы незначительно отличаются от теоретических и

повторяют ту же закономерность распределения полей потоков у тела птицы и изменяются от $0,38\times10^{-4}$ до $1,2\times10^{-3}$ м^3/с.

Выводы

Полученные в ходе работы зависимости позволяют определять скорость, избыточные температуры и расход воздуха в конвективном потоке, обтекающем тело птицы, или других источников тепла.

При росте массы птицы происходит увеличение поверхности, с которой идет тепловыделение, а это создает условия для возрастания скорости потоков воздуха у тела. Так, при изменении массы от 0,05 до 2,80 кг теоретически установлено, что происходит увеличение скорости от 0,35 до 0,47 м/с. Экспериментально подтверждена закономерность изменения (от 0,32 до 0,45 м/с) скоростных потоков у тела птицы. Таким образом, использовать тепло для обогрева помещений можно при рекуперативном обмене.

При увеличении массы птицы происходит увеличение выделения тепла, что приводит к изменению скорости потока воздушных масс у тела птицы. В результате общая температура у тела снижается. Так, при изменении массы от 0,05 кг температура изменяется от 38,5 °С до 29 °С, а эмпирические значения составляют от 36 до 28 °С

Увеличение массы тела птицы, приводящее к возрастанию потоков воздушных масс у тела птицы, и изменяющееся от 4,5× 10-4 до 1,4×10-3 м^3/с, создает условия для использования этого тепла для последующей утилизации с целью обогрева помещений птичников в зимнее время. Такое решение значительно снизит затраты на отопление помещений.

Литература

1. Подгорный С. А. Кошевой Е. П. Математическое моделирование процессов сушки и кондиционирования зерна. Потенциалы массопереноса: монография. Saarbrucken: изд-во LAPLAMBERT, 2012. С. 126–136.

2. Косачев В. С. Кошевой Е. П., Михневич А. Н., Миронов Н. А. Зависимости для описания теплообмена в слое // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2008. № 2–3. С. 82–83.

3. Подгорный С. А. Кошевой Е. П., Косачев В. С., Схаляхов А. А. Постановка задачи описания переноса тепла, массы и давления при сушке // Новые технологии. 2014. № 3. С. 20–27.

4. Меретуков З. А. Заславец А. А., Кошевой Е. П., Косачев В. С. Методы решения дифференциальных уравнений гидродинамики // Новые технологии. 2012. № 1. С. 36–41.

5. Петунина И. А. Математика для студентов агроинженерных специальностей: учебное пособие для ВУЗов. Краснодар: издательско-полиграфический центр «Издатель Григорьева Л. К.», 2011. С. 540–648.

6. Схаляхов А. А., Верещагин А. Г., Косачев В. С., Кошевой Е. П. Теплообмен в теплообменниках с полимерными мембранами // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2009. № 2–3. С. 79–81.

7. Меретуков З. А. Кошевой Е. П., Косачев В. С. Решение дифференциального уравнения отжима // Новые технологии. 2011. № 4. С. 54–57.

8. Ермолаев И. А., Жбанов А. И. Смешанная конвекция в вертикальном канале с дискретными источниками тепла на стенке // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2009. № 4. С. 40–46.

References

1. Podgorny S. A., Koshevoy E. P. Mathematical modeling of drying and conditioning grain. The potentials of mass transfer: a monograph. Saarbrucken: LAPLAMBERT, 2012. P. 126–136.

2. Kosachev V. S., Koshevoy E. P., Mikhnevich A. N., Mironov N. A. Dependencies for describing heat transfer in a layer // Proceedings of the higher educational institutions. Food technology. 2008. No. 2-3. P. 82–83.

3. Podgorny S. A., Koshevoy E. P., Kosachev V. S., Skhalyakhov A. A. Statement of the problem of description of heat, mass and pressure transfer during drying // New Technologies. 2014. No. 3. P. 20–27.

4. Meretukov Z. A., Zaslavets A. A., Koshevoy E. P., Kosachev V. S. Methods of solving differential equations of hydrodynamics // New Technologies. 2012. No. 1. P. 36–41.

5. Petunina I. A. Mathematics for students of agroengineering specialties: textbook for higher educational institutions. Krasnodar: publishing and printing center “Publisher Grigorieva L.K.”, 2011. P. 540–648.

6. Skhalyakhov A. A., Vereshchagin A. G., Kosachev V. S., Koshevoy E. P. Heat transfer in heat exchangers with polymeric membranes // Proceedings of the higher educational institutions. Food technology.

2009. No. 2-3. P. 79–81.

7. Meretukov Z. A., Koshevoy E. P., Kosachev V. S. Solution of a differential equation of extraction // New Technologies. 2011. No. 4. P. 54–57.

8. Ermolaev I. A., Zhbanov A. I. Mixed convection in vertical channel with discrete source of the heat on wall // Izvestia RAN, Mekhanika Zhidkosti i Gaza. 2009. No. 4. P. 40–46.

UDC 631.223.5: 628.8

Petunina I. A., Konovalova O. V.

NATURAL CONVECTIVE FLOW NEAR THE BIRD'S BODY AS A SOURCE OF HEAT

Summary. *Development and implementation of energy-saving equipment that uses heat generated by animals in process of vital activity is an important direction for the creation of optimal climatization of livestock houses. Theoretical studies of heat exchange between the bird's body (namely chickens) and the environment were conducted for the decision of problems of microclimate system development, as well as choice of a rational circulation scheme and heat utilization. The problem of poultry heat emission with the definition of speed, temperature and heat flux at the body of birds of different ages was addressed theoretically as this was the purpose of the research. The present studies of heat produced by a bird's body were conducted in 2014–2019 at the Laboratory of the Department of animal husbandry mechanization and life safety of the Kuban State Agrarian University and the university experimental training farm "Kuban". In our research, we used 10 broilers weighing from 0.08 to 2.00 kg, aged from 0 to 140 days. The heat emitted by broilers from the poultry farm of the university experimental training farm "Kuban" was the material of research. Theoretical data of convective heat transfer were the subject of the research. Standard methods of mathematical analysis and modelling were assumed as a basis for the survey taking into account used equipment and objects. In the laboratory, biometric measurements of young birds were performed before each study. We measured such parameters as height, volume, length, mass and body temperature. As a result of theoretical studies, values of speed, temperature and heat flux were obtained. Analyzing the results of the patterns of bird's body heat radiation, we found that speed increased from 1.25 to 1.67 m/s; airflow – from 0.00025 up to 0.00100 m^3; temperature varied from 38.5 to 29 °C.*

Keywords: *bird's body, convective flow, turbulent wall layer, excess heat, heat transfer, flow rate.*

Петунина Ирина Александровна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры высшей математики ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина»; 350004, Россия, г. Краснодар, ул. Калинина, 13: e-mail: petunina_1960@mail.ru.

Коновалова Оксана Владимировна, инженер-эколог НИИ прикладной и экспериментальной экологии ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина»; 350004, Россия, г. Краснодар, ул. Калинина, 13: oksanadanyukova@mail.ru.

Petunina Irina Aleksandrovna, Dr. Sc. (Techn.), associate professor, professor of the chair of Higher Mathematics of the Kuban State Agrarian University; 13, Kalinina str., Krasnodar, 350004, Russia; e-mail: petunina_1960@mail.ru.

Konovalova Oksana Vladimirovna, environmental engineer of the Research Institute of Applied and Experimental Ecology of the Kuban State Agrarian University; 13, Kalinina str., Krasnodar, 350004, Russia; e-mail: oksanadanyukova@mail.ru.

Дата поступления в редакцию – 17.03.2020.
Дата принятия к печати – 30.04.2020.