

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 631.3:636

И.Я. Федоренко,
Н.И. Капустин,
В.Н. Капустин,
И.Н. Бырдин

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОЙ (ЕСТЕСТВЕННОЙ) КОНВЕКЦИИ В ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ПОМЕЩЕНИЯХ БОЛЬШОЙ ВМЕСТИМОСТИ

Ключевые слова: микроклимат, мегаферма, тепловая конвекция, уравнения в частных производных, приближения Буссинеска, задача устойчивости, критерии Рейнальдса и Прандтля, вентиляция с естественным побуждением воздуха, размещение элементов вентиляции.

Актуальность проблемы

Микроклимат животноводческих помещений во многом определяет продуктивность животных, срок службы оборудования и самого здания, условия работы обслуживающего персонала. Однако проблема создания и поддержания параметров микроклимата далека от своего разрешения. Конечно, с помощью искусственного побуждения воздуха при использовании вентиляторов и теплообменников (кондиционирование), распределенной системы воздухопроводов, многофункциональных автоматических устройств и т.п. можно достичь требуемых параметров микроклимата, но возникает закономерный вопрос экономической эффективности такой вентиляционной системы. Расчеты и практика эксплуатации коровников в условиях Сибири показывают, что в зимний период до 30% удоя (в денежном вы-

ражении) необходимо отдавать на поддержание микроклимата в помещении. Это вряд ли приемлемо для производителей, и решение проблемы следует искать в первую очередь в эффективности использования вентиляции с естественным побуждением воздуха.

Все эти проблемы усугубляются в животноводческих помещениях большой вместимости, характерных для так называемых мегаферм. Например, в Алтайской крае построено и строится ряд коровников на 500, 600 и 800 голов с беспривязной технологией содержания и оборудованием фирмы DeLaval. Ширина таких коровников составляет 36 и 48 м. Предусмотренные в проектах системы вентиляции через проемы в продольных стенах и световые фонари, установленные по коньку крыши здания обеспечивают требуемый температурно-влажностный и газовый режим только в узком диапазоне температур наружного воздуха. В зимний период при снижении температуры до $-6-8^{\circ}\text{C}$ они оказались практически неработоспособными. В проемах со стороны притока воздуха происходит обледенение вентиляционных элементов и устройств связанного управления, что ведет не только к отклонению параметров микроклимата,

но и к поломке вентиляционных и регулирующих устройств. При нарушении заданного режима работы систему вентиляции полностью закрывают, плиты перекрытия и стены помещения насыщаются влагой и теряют термическое сопротивление, что ведет к их обледенению в период очень низких температур наружного воздуха (-30°C и ниже). Микроклимат в помещении далек от оптимального, т.е. содержание аммиака в 4 раза превышает предельно допустимые нормы, относительная влажность составляет 100% при температуре воздуха в помещении от 0 до 3°C.

Поэтому в помещениях большой вместимости необходимы новые подходы к разработке схем вентиляции. Исследование, на наш взгляд, следует начинать с выяснения формирования естественных потоков воздуха, возникающих в отсутствии какой-либо вентиляции. Решение этой задачи позволит определиться с расположением приточно-вытяжных элементов и их производительности из условия непротиворечия закономерности формирования естественных потоков воздуха, т.е. потоки, организованные естественной вентиляцией, должны органически вписываться в общую конвекцию.

Математическая формировка задачи

Конвекция – это перенос различно нагретых частей в жидкостях или газах в поле силы тяжести. В животноводческих помещениях пол и потолок имеют разную температуру: зимой большую температуру имеет нижняя часть – пол, а летом – потолок. Конвекция возможна в зимнее время стойлового периода, когда более теплый воздух у пола и в зоне нахождения животных за счет меньшей плотности поднимается, его место занимает более плотный холодный воздух. Подогрев нижнего слоя воздуха в зоне пола происходит за счет тепла земли, выделяемых животными экскрементов, тепла корпуса животных и выдыхаемого ими воздуха. Большая ширина животноводческих помещений позволяет рассматривать конвекцию, как происходящую в горизонтальном канале с твердой верхней и нижней стенками (рис.). Расчетная схема для этого случая представлена на рисунке и соответствует картине конвекции в поперечном разрезе животноводческого помещения.

Итак, рассмотрим слой воздуха в животноводческом помещении высотой h , находящийся в поле силы тяжести. Допус-

тим, что в зоне потолка поддерживается постоянная температура T_0 , в зоне пола (зона нахождения животных) – температура $T_0 + \Delta T$. Ввиду разности плотностей воздуха в зоне нахождения животных и потолка создаются локальные конвекционные потоки.

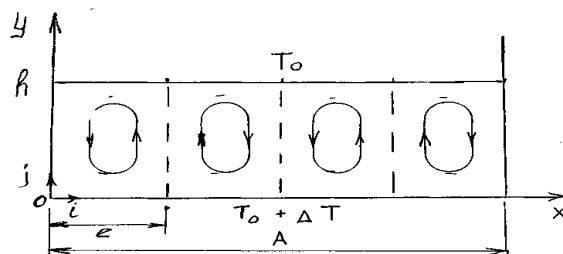


Рис. Возможная конфигурация течений воздуха, возникающих при температурной конвекции

В постановках таких задач применяют распределенную систему, состояние которой характеризуется изменяющимися во времени полями распределения скорости $V(x, y, z, t)$, плотности $\rho(x_1, y_1, z_1, t)$ и температуры $T(x_1, y_1, z_1, t)$. Изменение этих полей во времени описывается системой уравнений с частными производными [1-5]:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \nabla)_{v=} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 v + g; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla(vT) = K \nabla^2 T; \quad (3)$$

$$\rho = \rho_0 [1 - \gamma(T - T_0)]; \quad (4)$$

где $\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$ – векторный оператор Гамильтона (i, j, k – орты прямоугольной системы координат);

g – ускорение силы тяжести;

$p(x, y, z)$ – поле давлений;

ν – коэффициент кинематической вязкости;

k – коэффициент температуропроводности;

γ – коэффициент теплового расширения воздуха;

ρ_0, T_0 – значение плотности и температуры воздуха, принятые за начальную точку отсчета.

Уравнения (1-3), записанные в векторной форме, являются: (1) – уравнением Навье-Стокса, (2) – неразрывности, (3) – уравнением теплопроводности. Уравнение (4) устанавливает зависимость плотности воздуха от температуры.

К уравнению (4) нужно применить граничные условия, что диктуется наличием

ограничивающих поверхностей (пол, стены, потолок), на границе взаимодействия которых с воздухом происходит прилипание воздуха и его скорость равна нулю, т.е. обращаются в нуль все компоненты скорости. При этом граничные условия для нашей расчетной схемы (рис. 2) могут быть записаны в виде:

$$u(0, y, t) = 0 \quad u(h, y, t) = 0; \quad (5)$$

$$v(x, 0, t) = 0 \quad v(x, h, t) = 0; \quad (6)$$

$$T(x, 0, t) = T_0 + \Delta T \quad T(x, h, t) = T_0, \quad (7)$$

где u, v – проекции вектора скорости V на оси x и y .

Таким образом, при постановке граничных условий мы воспользовались двумерной картиной конвекции, т.е. будем рассматривать движение воздуха вдали от торцевых стен животноводческого помещения.

Таким образом, уравнение (1-4) и граничные условия (5-7) в совокупности составляют математическую модель свободной (естественной, тепловой) конвекции в широких ($B \gg h$) животноводческих помещениях большой вместимости животных.

Анализ математической модели

Полученная математическая модель несмотря на ее двумерность является очень сложной, включает семь скалярных уравнений и шесть граничных условий. В таком виде она практически неразрешима даже для стационарного движения, поскольку нужно отыскать неизвестные функции V, p, ζ, T . Следовательно, нужны упрощающие действия. Одно мы уже сделали – вместо трехмерной картины движения ограничились двумерной.

Далее вводим обычное для подобных задач допущение, которое называют приближением Буссинеска. Его суть заключается в том, что зависимость плотности воздуха от температуры учитывается только в одном месте математической модели – в члене с подъемной (архимедовой) силой в уравнениях движения. Многочисленные опыты показывают, что в подобных схемах конвекции могут возникать замкнутые контуры течений, так называемые ячейки Бенара [3, 5, 7]. Собственно они и изображены на рисунке. Заметим, что в трехмерном случае это конвективные валы, простирающиеся по всей длине коровника.

Далее, откажемся от существенного влияния стен на качественную картину конвекционных движений. Связано это, во-первых, с малой суммарной площадью

стен по отношению к суммарной площади пола и потолка, что имеет место для широких помещений, где это отношение не более чем $1/10$. Во-вторых, поскольку температура стен меньше температуры воздуха, то холодный воздух будет опускаться вниз вдоль стен, что вписывается в общую картину циркуляции воздуха. Скорее всего, влияние стен заключается в том, что циркуляция воздуха в ячейках, прилегающих к стенам, будет осуществляться несколько быстрее, чем в других ячейках.

При сделанных допущениях наша модель может быть сведена к гидродинамической модели Лоренца, записываемой в обыкновенных дифференциальных уравнениях.

Действительно, если ввести, следуя Лоренцу [8], функцию тока $\tau(x, y, t)$, для которой

$$u = \frac{\partial \tau}{\partial x} \quad v = \frac{\partial \tau}{\partial y}, \quad (8)$$

а также отклонение $\Theta(x, y, t)$ от линейного профиля температуры,

$$T(x, y, t) = T_0 + \Delta T - \frac{\Delta T}{h}y + \Theta(x, y, t), \quad (9)$$

то уравнения (1-3) можно представить в ином виде, а именно:

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \tau = - \frac{\partial(\tau, \nabla^2 \tau)}{\partial(x, y)} + \nu \nabla^4 \tau + gL \frac{\partial \Theta}{\partial x}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \Theta = - \frac{\partial(\tau, \Theta)}{\partial(x, y)} + \frac{\Delta T}{h} \frac{\partial \tau}{\partial x} + K \nabla^2 \Theta, \quad (11)$$

$$\nabla^4 \equiv \frac{\partial^4}{\partial x^4} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}.$$

Лоренц показал, что при аппроксимации уравнений (10) и (11) по методу Галеркина возможно представление и их в виде системы трех обыкновенных дифференциальных уравнений, но в новых переменных X, Y, Z :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \sigma(Y - X), \quad \dot{Y} = X - Y - XZ, \\ \dot{Z} &= bZ + XY, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{где } \sigma = \frac{\nu}{K}; \quad b = \frac{4}{1 + (R/R_c)^2}; \quad r = \frac{R}{R_c} \sim \Delta T;$$

R, R_c – число Релея и критическое число Релея.

Модель Лоренца представляет собой динамическую систему с трехмерным фазовым пространством. Переменная X пропорциональна скорости вращения конвективных валов, величины Y и Z отвечают за распределение температуры, соответственно, по горизонтали и вертикали. Точками в уравнениях (12) обозначены производные по безразмерному времени τ

$$\tau = \frac{\pi^2}{h^2} \left[1 + \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right] kt$$

Управляющие параметры σ , b , r имеют следующий физический смысл.

Параметр σ есть отношение коэффициента кинематической вязкости ν и коэффициента температуропроводности. Его называют числом Прандтля.

Параметр b определяется геометрией конвекционной ячейки, а именно отношением ее вертикального h и горизонтального l размеров.

Внешний управляющий параметр r , пропорциональный разности температур у пола и потолка коровника, есть отношение числа Релея R к критическому числу Релея R_c .

$$R = \frac{g \gamma h^3 \Delta T}{\nu K} ; \quad (13)$$

$$R_c = \frac{\pi^4}{(h/l)^2} \left[1 + \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right]^4. \quad (14)$$

Хотя уравнения (12) нелинейны, но их анализ существенно проще, чем исходных уравнений (1-4). Поэтому они хорошо изучены, а сравнение с экспериментом для многих подобных систем показывает, что данная математическая модель дает правильную качественную картину развития конвекции в горизонтальном слое жидкости или газа.

Системе Лоренца посвящена обширная литература, в которой устанавливается три режима течения в горизонтальном слое:

- а) устойчивость (покой) при $r < 1$;
- б) стационарная циркуляция против или по часовой стрелке, отвечающая конвективным валом (рис.) при $r < 1$, $\sigma < \sigma_c$;
- в) стохастическое движение среды при достижении r некоторого критического значения r_c (σ , b).

Для выявления характера течения воздуха в животноводческом помещении подсчитаем число Релея, например, для коровника в зимний период. При этом примем $h = 5$ м, $\Delta T = 12^\circ\text{C}$; $\nu = 0,15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; $\gamma = 3,665 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$

Коэффициент температуропроводности воздуха подсчитаем через коэффициент теплопроводности λ , приводимый во многих справочниках

$$K = \frac{\lambda}{\rho c},$$

где ρ, c – плотность и теплоемкость воздуха ($\rho = 1,293 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $c = 1006 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$).

При $\lambda = 257 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ имеем

$$K = \frac{257 \cdot 10^{-4}}{1,293 \cdot 1006} = 1,976 \cdot \frac{10^{-5} \text{ М}^2}{\text{с}}$$

Таким образом, имеются все данные для расчета R :

$$R = \frac{9,81 \cdot 3,665 \cdot 10^{-3} \cdot 5^3 \cdot 12}{0,15 \cdot 10^{-4} \cdot 1,976 \cdot 10^{-5}} = 18 \cdot 10^{10}$$

Критическое число Релея посчитаем по формуле (14):

$$R_c = \frac{3,14^4}{5/1} \left[1 + \left(\frac{5}{1} \right)^2 \right]^4$$

$$\text{Число } r = \frac{R}{R_c} = \frac{18 \cdot 10^{10}}{34,17 \cdot 10^4} \approx 5,3 \cdot 10^5 \gg 1$$

Таким образом, можно уверенно утверждать, что в широких животноводческих помещениях из трех возможных режимов естественной конвекции реализуется режим стохастической (турбулентной) конвекции. Он характеризуется беспорядочными газовыми потоками с интенсивным их перемешиванием, соответственно, конфигурация течений воздуха не будет соответствовать представленной на рисунке.

Выводы

1. Активное внедрение новых зарубежных технологий и оборудования в широкогабаритных животноводческих помещениях без учета климатических особенностей Сибири создало проблему в экономической эффективности проектных вентиляционных систем.

2. Сдерживающим фактором создания эффективных вентиляционных систем является недостаток результатов натурных и теоретических исследований и, в первую очередь, приемлемой для практического использования математической модели, определяющей режим течения воздушных потоков без участия систем вентиляции.

3. Анализ предложенной математической модели позволяет предположить, что в широкогабаритных помещениях реализуется режим стохастической естественной конвекции.

4. Расположение и производительность приточно-вытяжных элементов должны определяться из условия непротиворечия закономерности формирования естественных стохастических потоков, а выбор типа вентиляционной системы должен быть соподчинен снижению энергозатрат на обеспечение микроклимата, что обуславливает повсеместное использование естественной вентиляции.

Библиографический список

1. Ландау Л.Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. – М.: Наука, 1988. – 736 с.
2. Лойцанский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцанский. – М.: Наука, 1978. – 736 с.
3. Гершуни Г.З. Устойчивость конвективных движений / Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкий, А.А. Непомнящий. – М.: Наука, 1989. – 320 с.
4. Новиков И.И. Теория подобия в термодинамике и теплопередаче / И.И. Новиков, В.М. Боришанский. – М.: Атомиздат, 1979. – 184 с.

5. Смышляев Л.П. Управление технологическими процессами: Математические модели / Л.П. Смышляев, В.М. Лыкосов, Л.П. Осипков. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. – 284 с.
6. Шустер Г. Детерминированный хаос: Введение / Г. Шустер; пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 240 с.
7. Кузнецов С.П. Динамический хаос (курс лекций) / С.П. Кузнецов. – М.: Физматлит, 2001. – 296 с.
8. Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow / E. N. Lorenz // J. Atmos. Sci. 1963. – V. 20. – № 3. – P. 130-141.



УДК 338.246.2

П.Л. Пронченко



**НЕКОТОРЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ УЛУЧШЕНИЯ
ОСНАЩЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Ключевые слова: механизм, качество, управление, дистрибьютор, кустовые дилеры, стимулирование, хозяйства, сельскохозяйственное машиностроение, маркетолог, технические средства, лизинг, кредит, модель.

Введение

В проекте «Стратегии машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России на период до 2020 года» отмечается, что машинно-технологический ресурс агрокомплекса в современном сельском хозяйстве используется недостаточно, и поставить его на службу интенсивному сельскохозяйственному производству – задача первостепенной важности.

Однако действующие рыночные механизмы в стране не способны сами по себе обеспечить эквивалентность товарообменных отношений как на первичном, так и на вторичном рынке сельскохозяйственной техники, необходимый ассортимент и качество новых и восстановленных машин и ремонтно-технических услуг [1]. В связи с этим органы государственного управления должны иметь возможность регулировать рыночные процессы, приводить их в соот-

ветствие с задачей технического обеспечения сельскохозяйственных предприятий (СХП) и воспроизводства машинно-тракторного парка. Чтобы быстро решить проблему повышения эффективности производства в хозяйствах со слабой технической базой, они должны более активно, чем сейчас, взаимодействовать с машинно-технологическими станциями [2, 3]. Это может стать возможным, если в региональных АПК будет принята к реализации новая система рыночных отношений.

Предложения по решению проблемы

Важнейшими звеньями этого рынка могут выступать региональный (межрегиональный) дистрибьютор, кустовые дилеры (районные, межрайонные), предприятия мелкого ремонтно-обслуживающего и торгового бизнеса.

Схема организации регионального рынка сельскохозяйственной техники представлена на рисунке.

Дистрибьютор должен быть проводником государственной политики технического обеспечения аграрного производства на рынке сельскохозяйственной техники включая вторичный рынок. Одна из его основных задач в этом плане – изучить