

ТЕС встановлено, що зростання питомої витрати теплоти бруто на турбіну через зношення кінцевих ущільнень при постійній потужності становить 1,3%,

що еквівалентно зниженню потужності на 1,9% при постійній витраті теплоти на турбіну.

#### Література

1. Типовая энергетическая характеристика турбоагрегата К-300-240-2 ХТГЗ. [Текст]. — Введ. 14.02.1977. - М.: Изд-во СПО Союзтехэнерго, 1977. - 27 с.
2. Типовая энергетическая характеристика турбоагрегата К-300-240 ХТГЗ второй модификации. [Текст]. — Введ. 28.08.1976. - М.: Изд-во СПО Союзтехэнерго, 1976. - 25 с.
3. Тепловые испытания турбины К-300-240-2 ХТГЗ ст. №5 Трипольской ГРЭС. [Текст]: отчет «ЛьвовОРГРЕС»; рук. Теплицкий М.Г. и др. - Львов, 1974. - 46 с.
4. Тепловые испытания турбины типа К-300-240 ХТГЗ ст. №10 Змиевской ГРЭС. [Текст]: отчет «ЛьвовОРГРЕС»; рук. Михайловцев Е.И. и др. - Львов, 1972. - 38 с.
5. Тепловые испытания турбины типа К-300-240 ХТГЗ ст. №2 Трипольской ГРЭС. [Текст]: отчет «ЛьвовОРГРЕС»; рук. Теплицкий М.Г. и др. - Львов, 1973. - 43 с.

*Розглянуто результати моделювання теплових процесів в живому організмі з залученням математичного апарату теорії теплопровідності для інтерпретації експериментальних даних*

*Ключові слова: температура, теплопровідність, розподіл температури*

*Рассмотрены результаты моделирования тепловых процессов внутри живого организма с привлечением математического аппарата теории теплопроводности для интерпретации данных, полученных опытным путем*

*Ключевые слова: температура, теплопроводность, распределение температуры*

*The results of modeling of thermal processes within a living body with using the mathematical apparatus of the heat conduction theory for the interpretation of data obtained experimentally are considered*

*Keywords: temperature, heat conductivity, temperature distribution*

УДК 536.5:53.082.6

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПО ДАННЫМ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕЛА

**М. Г. Самынина**

Младший научный сотрудник лаборатории  
Лаборатория искусственного осеменения животных и  
репродуктивной биологии животных  
Институт животноводства  
Национальная академия аграрных наук  
ул. 7-й Гвардейской Армии, 3, пгт. Кулинич,  
Харьковский р-н, 62404  
Контактный тел.: (057) 740-31-67

При рассмотрении живого объекта с точки зрения физики существует возможность объяснить экспериментальные данные и решить многие теоретические проблемы и практические задачи. Так, определенные трудности вызывает исследование температуры, которая является комплексным показателем состояния биологической системы. Для млекопитающих как представителей гомеотермных свойственно относительное постоянство температуры тела, однако исследование и объяснение теплофизических изменений вызывает ряд неточностей, обусловленных нарушением естественных терморегуляционных функций организма в результате фиксации животных или наркоза [1].

Теоретические аспекты теплофизики детально описывают тепловые процессы, происходящие в твердых телах. Теория теплопроводности предоставляет метод оценки температуры твердого тела – по величине теплового потока от более нагретого участка в сторону менее нагретого [1]. В одномерных случаях решение дифференциального уравнения, которому удовлетворяет вектор теплового потока, позволяет найти распределение температуры  $T$  [2]:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>,  $c_v$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К),  $k$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Используя математический аппарат теории теплопроводности, целесообразно рассмотреть экспериментальные данные, полученные путем измерения температуры во влагилице у самок крупного рогатого скота, с целью их интерпретации.

**Моделирование тепловых процессов на основе теории теплопроводности**

Исследуемый в данной работе тепловой процесс можно характеризовать как стационарный, так как температурный градиент в полости влагилица от центра тела к периферии не зависит от времени суток [3, 4], не смотря на то, что у коров температура ядра тела меняется согласно циркадным ритмам [5]. В этом случае уравнение (1), описывающее тепловой поток, примет вид

$$\frac{d}{dx}(k \frac{dT}{dx}) = 0 \tag{2}$$

В качестве физической модели рассмотрим полую трубку (рис. 1), которую собой представляет полость влагилица у телок [6]. Для трубки длиной  $l$  вдоль ее оси необходимо решить уравнение (2). Начало координат поместим на плоскости с меньшей температурой, таким образом, граничные условия имеют вид: при  $x=0$   $T=T_1$ , а при  $x=l$   $T=T_2$ .

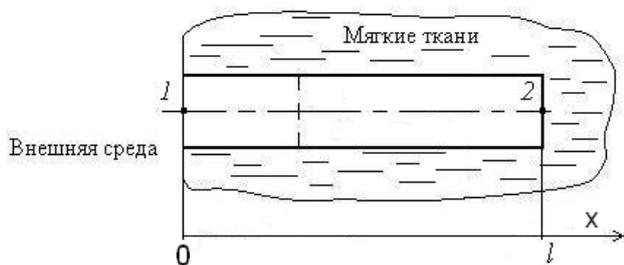


Рис. 1. Полая трубка, принятая в качестве физической модели ( $T_1(t) < T_2(t)$ )

Предполагаем, что на распределение температуры внутри трубки могут влиять теплообменные процессы со стороны мягких тканей; среда внутри такой трубки может быть однородной с точки зрения теплопроводности ( $k=const$ ) или неоднородной ( $k=k(x)$ ). Поэтому моделирование было проведено на основе трех гипотез.

**Модель №1. Стационарное распределение температуры внутри однородной трубки.** Из уравнения (2) следует, что  $kdT/dx=const$ . Если  $k=const$ , то  $dT/dx=const$ . Интегрируя, получим

$$T = A_1x + B_1,$$

где  $A_1$  и  $B_1$  – постоянные интегрирования, которые определяются путем решения системы уравнений, составленной при введении в полученное выражение указанных выше граничных условий. Таким образом, выражение для стационарного распределения температуры внутри однородной трубки имеет следующий вид:

$$T = \frac{T_2 - T_1}{l}x + T_1.$$

**Модель №2. Стационарное распределение температуры внутри однородной трубки с учетом внешней теплопередачи.** Известно, что благодаря процессам теплообмена возникает тепловой поток через границу тел, обусловленный перепадом температуры на этой границе. Величина этого потока  $j_n$  пропорциональна разности температур тел на границе. С учетом дополнительного теплового потока через боковую поверхность трубки вместо уравнения (1) получится

$$\rho c_v S \frac{\partial T}{\partial t} = S \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) + \alpha p (T_0 - T), \tag{3}$$

где  $S, p$  – площадь и периметр поперечного сечения трубки, соответственно;  $T$  – температура тела, а  $T_0$  – температура окружающих мягких тканей. Постоянная  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К). Предполагая  $k$  постоянным и вводя обозначение

$$b^2 = \frac{\alpha p}{\rho c_v S},$$

для случая стационарного распределения температуры внутри однородной трубки с учетом внешней теплопередачи уравнение (3) переходит в

$$\chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + b^2 (T_0 - T) = 0. \tag{4}$$

Примем, что процесс распределения температуры в мягких тканях имеет характер стационарного распределения в однородной среде, поэтому  $T_0$  выразим формулой

$$T_0 = \frac{T_2 - T_1}{l}x + T_1.$$

Обозначим  $\beta = b/\chi$ . Тогда общее решение уравнения (4) есть

$$T = A_2 e^{\beta x} + B_2 e^{-\beta x} - \frac{T_2 - T_1}{l}x - T_1.$$

Постоянные интегрирования  $A_2$  и  $B_2$  определяются путем решения системы уравнений, которая составляется при введении в полученное выражение граничных условий, указанных выше. В результате,

$$T = \frac{2T_1 \text{sh}(\beta(1-x)) + 2T_2 \text{sh}(\beta x)}{\text{sh}(\beta l)} - \frac{T_2 - T_1}{l}x - T_1.$$

**Модель №3. Стационарное распределение температуры внутри неоднородной трубки.** Примем, что теплопроводность внутри трубки меняется с координатой  $x$  по линейному закону  $a+bx$ . Из уравнения (2) следует, что  $k(x)dT/dx=const$ . В результате интегрирования получено выражение

$$T = \frac{A_3}{b} \ln|a + bx| + B_3,$$

где  $A_3$  и  $B_3$  – постоянные интегрирования, которые определяются из граничных условий. Для стационарного распределения температуры внутри неоднородной трубки математическое выражение имеет следующий вид:

$$T = T_1 + (T_1 - T_2) \frac{\ln \left| \frac{a + bx}{a} \right|}{\ln \left| \frac{a}{a + bl} \right|}.$$

### Экспериментальная часть

Исследования по термометрии проводили в Институте животноводства НААН на 3 подопытных телках молочных пород случного возраста. По таблице случайных чисел с целью исключить систематические влияния, связанные с изменением температуры в течение эстрального цикла [3, 5], были определены 2, 9 и 15 дни цикла. Учитывая максимальное расстояние от вульвы, на которое можно поместить датчик во влаглище, измерения проводили на глубине 4, 8, 12, 16, 20, 24 и 28 см.

Необходимый для оценки температуры датчик (термодатчик) с чувствительностью 0,025 кОм/°С был изготовлен по схеме [7]; максимальная ошибка линеаризации схемы не превышает  $1 \times 10^{-3}$  °С. Термодатчик был оснащен шкалой, с помощью которой определяли расстояние от внешних половых органов.

На основании статистической обработки [8] результатов измерений построены следующие зависимости температуры в полости влаглища от глубины, на которой проведено измерение (рис. 2). Кривые представляют собой групповые средние для температур, измеренных на вышеуказанных расстояниях и рассчитанных для каждого животного отдельно. На рисунке также показан обобщающий график для общей средней с указанием общего среднего квадратического отклонения.

### Оценка адекватности полученных физико-математических моделей

Для построения графиков распределений температуры в полученные математические выражения были введены необходимые табличные и исходные данные [9, 10]. На рисунке 3 приведены зависимости температуры, которые были определены экспериментальным путем и в результате моделирования. Так как в нашем случае  $n < 30$ , то для оценки информативности полученных математических выражений моделей №1, №2 и №3 был использован нормированный коэффициент детерминации, который составил 0,85, 0,79 и 0,95, соответственно. Так как эти значения выше 0,5, следовательно, все три модели высоко информативны и в разной степени отражают исследуемые тепловые процессы.

Оценка достоверности моделей показала, что рассчитанные критерий Фишера и уровень значимости (для модели №1:  $\alpha_p = 0,003 < 0,05$  и  $F = 27,62$ ; для модели №2:  $\alpha_p = 0,008 < 0,05$  и  $F = 18,42$ ; для модели №3:  $\alpha_p = 0,0001 < 0,05$  и  $F = 127,26$ ) подтверждают значимость вычисленных коэффициентов детерминации.

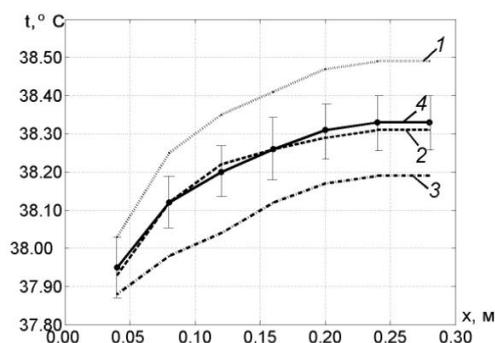


Рис. 2. Зависимости температуры от глубины, на которой проведено измерение: 1, 2, 3 – температура у животного 1, 2, 3 (соответственно); 4 –  $M \pm \sigma$

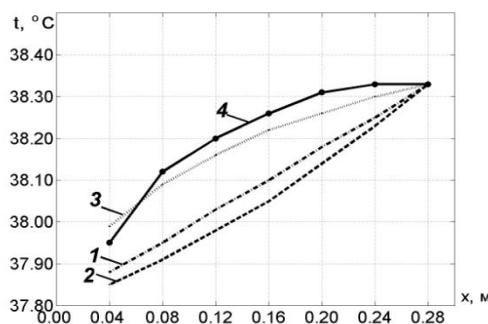


Рис. 3. Распределения температуры, полученные экспериментальным путем и с помощью физико-математического моделирования: 1, 2, 3 – модели № 1, № 2, № 3, соответственно; 4 – экспериментальные данные

Для характеристики точности каждой модели была определена средняя относительная ошибка аппроксимации [8], которая составила для моделей №1, №2 и №3 0,29 %, 0,38 % и 0,05 %, соответственно. Величина меньше 5% свидетельствует о хорошем уровне точности всех трех моделей.

Таким образом, допустимо предполагать, что исследуемый тепловой процесс носит характер стационарного распределения температуры в однородной среде. Для более точного изучения необходимо учитывать, что исследуемая среда является неоднородной с точки зрения теплопроводности. Кроме того, влияние на теплообменные процессы со стороны мягких тканей можно не учитывать.

### Выводы

1. Проведено моделирование тепловых процессов внутри живого организма с привлечением математического аппарата теории теплопроводности. Получены достаточно информативные,

- достоверные и точные физико-математические модели.
- Установлено, что наиболее точно изучаемый тепловой процесс характеризует стационарное

распределение температуры в неоднородной, с точки зрения теплопроводности, среде.

Литература

- Иванов К.П. Основы энергетики организма: Теоретические и практические аспекты. / Иванов К.П. – Ленинград: Наука, 1990.  
Том 1: Общая энергетика, теплообмен и терморегуляция. – 1990. – 307 с.
- Сивухин Д.В. Общий курс физики: Учеб. пособие для ВУЗов. / Сивухин Д.В. – Москва: Наука, 1990.  
Т. II: Термодинамика и молекулярная физика. – 1990. – 592 с.
- Саминіна М.Г. Аналіз змін вагінальної температури у корів для виявлення стадії еструсу / М. Г.Саминіна // НТБ ІТ УААН, – Харків – 2009. – №99. – С. 36–42.
- Саминіна М. Г., Хмельков В.М. Взаємозв'язок різниці температур у піхві корів і статевого циклу / М. Г. Саминіна, В. М. Хмельков // НТБ ІБТ НААН. – Львів – 2010. – Випуск 11, № 2-3. – С. 411-416.
- Piccione G. Daily and estrous rhythmicity of body temperature in domestic cattle / Piccione G., Caola G. and Refinetti R. // BMC Physiol. – Vol. 3, No. 7. – 2003. – 8 p. – Режим доступу до журн. :  
<http://www.biomedcentral.com/1472-6793/3/7>.
- Бугров А. Д. Выявление и выборка коров и телок в охоте: [Методические рекомендации] / А. Д. Бугров, А. В. Медведовский, А. В. Субота. – Х. : Институт животноводства УААН, 2005. – 47 с.
- Пат. кор. мод. №37243, МПК<sup>6</sup> G01K 7/16, 7/22. Спосіб вимірювання малих змін температури / Саминіна М. Г.; заяв. і патентовласник Саминіна М. Г. – u200806378; заявл. 13.05.08; опубл. 25.11.08, Бюл. №22.
- Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: [Учеб. пособие для вузов] / В. Е. Гмурман. – [10-е изд.]. – Москва: Высшая школа, 2004. – 479 с.
- Кухлинг Х. Справочник по физике, [пер. с нем., 2-е изд.]. – Москва: Мир, 1985. – 250 с.
- Application of thermal imaging for cattle management / [H.J. Hellebrand, U. Brehme, U. Stollberg and H. Jacobs]. In: Proc., 1<sup>st</sup> European Conference on Precision Livestock Farming, Berlin, Germany. – 2003. – P. 761-763.

**Стаття містить порівняльний аналітичний аналіз вдосконалених алгоритмів керування полем енерговиділення з алгоритмами, які використовувались раніше. Наведено результат розрахунку чотирирічної паливної кампанії, зроблений в кодї БІПР-7А**

**Ключові слова:** офсет, У-алгоритми, паливна кампанія

---

**Статья содержит сравнительный аналитический анализ усовершенствованных алгоритмов управления неравномерностью поля энерговыделения с алгоритмами, используемыми ранее. Приведен результат расчета четырехлетней топливной кампании, сделанный в коде БИПР-7А**

**Ключевые слова:** офсет, У-алгоритмы, топливная кампания

---

**This article contains comparison of analytical analysis of Enhanced-algorithms to control power distribution in active zone with algorithm that was used before. The result of calculation of four-year fuel-campaign with using program code BIPR-7A is produced**

**Keywords:** offset, E-algorithms, fuel campaign

УДК 621.039

# SAFETY ASSESSMENT OF THE IMPLEMENTATION OF ENHANCED-ALGORITHMS AT UKRAINIAN NPPS

**R. S. Glushenkov**  
 Postgraduate  
 Department of nuclear power plants and engineering thermal physics  
 National Technical University of Ukraine “Kyiv polytechnic institute”  
 Prospect Peremogy, 37, Kyiv 03056, Ukraine  
 Contact tel.: (096) 769-51-09  
 E-mail: rs.glushenkov@gmail.com