

## РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ БИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ МОЛОЧНОЙ ФЕРМЫ И СОЛНЕЧНОЙ ТЕПЛИЦЫ С ТЕПЛОВЫМИ АККУМУЛЯТОРАМИ

В.Т. Тайсаева, Л.Р. Мазаев

*Рассматривается метод создания энергоэффективных биотехнических систем путем на примере моделирования энергоэффективных молочной фермы и солнечной теплицы. Приводится метод определения энергетической эффективности аккумуляторов теплоты с различными теплоаккумулирующими насадками.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** устойчивое развитие, энергоэффективность, моделирование биотехнических систем.

Метод создания энергоэффективных биотехнических систем

В животноводстве в настоящее время большое значение приобрел вопрос снижения энергозатрат на отопление и вентиляцию ферм в связи с резким подорожанием энергоносителей. Расходы на потребляемую энергию в отопительный период года сопоставимы с расходами на кормление животных. Многовариантность технических решений для снижения энергозатрат при формировании нормативного микроклимата в животноводческих помещениях свидетельствует о необходимости комплексного учета взаимодействия технических средств, биоорганизмов, внутренней и наружной среды, что вместе составляет единую биотехническую систему (БТС).

Для установления свойств и взаимосвязей между факторами и процессами, влияющими на состояние БТС, необходимо применить метод системных исследований. Для обоснования рациональных режимов работы БТС необходимо знать влияние на продуктивность животных суммы параметров воздушной среды помещения: температуры  $T$ , влажности  $\varphi$ , аммиака  $\text{NH}_3$ , углекислого газа  $\text{CO}_2$ , подвижности воздуха  $V$  в виде функции продуктивности:

$$P = f(T_{\text{вн}}, \varphi_{\text{вн}}, \text{NH}_3, \text{CO}_2, V) \quad (1)$$

Для сложной системы в целом построить математическую модель теоретическим методом не представляется возможным. Поэтому математическая модель БТС получена экспериментально-статистическим методом. Параметры, характеризующие протекание технологического процесса в БТС, классифицируем на входные и выходные.

Входные параметры: мощность вентиляционно-отопительных установок (ВОУ) —  $P$ , кВт; подача вентиляторов —  $L$ , м<sup>3</sup>/ч; корма

—  $K$ , кормовая единица; тепло —  $Q_{\text{ж}}$ , кДж/ч и влаговыведения животных —  $D_{\text{ж}}$ , г/ч; количество теряемого тепла: на испарение —  $Q_{\text{исп}}$ , кДж/ч; через ограждающие конструкции —  $Q_{\text{огр}}$ , кДж/ч; параметры наружной среды: температура —  $\theta_{\text{н}}$ , °С, влагосодержание —  $d_{\text{н}}$ , г/кг.

Входные параметры делим в свою очередь на регулируемые  $K, P, L$  и нерегулируемые  $Q_{\text{ж}}, D_{\text{ж}}, Q_{\text{исп}}, Q_{\text{огр}}, \theta_{\text{н}}, d_{\text{н}}$ , которые взаимосвязаны между собой (кроме кормов) уравнениями теплового и влажностного баланса.

Выходные параметры — это группа параметров, зависящая от входных параметров и подразделяемая на показатели процесса (продуктивность —  $P$ , кг, минимум приведенных затрат —  $e$ , руб/кг), а также на показатели, проверяемые на технологические ограничения (по температуре —  $\theta_{\text{вн}}$ , °С; относительной влажности —  $\varphi_{\text{вн}}$ , %; содержанию аммиака —  $\text{NH}_3$ , мг/л, углекислого газа —  $\text{CO}_2$ , % и подвижности воздуха —  $v$ , м/с) воздушной среды коровника, которые налагаются условиями нормального технологического процесса и возможностями ВОУ.

Параметрическая схема входных и выходных параметров БТС приведена на рисунке 1.

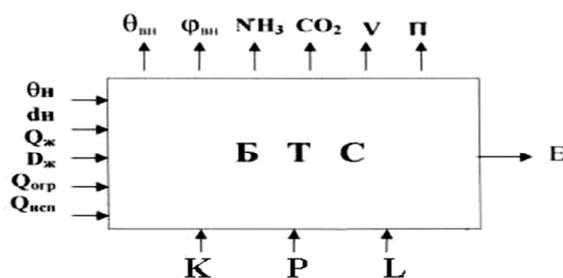


Рисунок 1- Параметрическая схема входных и выходных параметров БТС

Полученная ранее автором модель действия параметров микроклимата внут-ренней среды помещения на продуктивность коров  $\Pi = f(\varphi_{вн}, \theta_{вн}, \text{NH}_3, \text{CO}_2, v)$ :

$$\Pi\left(\frac{\theta}{\theta_m}, \frac{\varphi}{\varphi_m}\right) = 5.043 + 1.315 \frac{\theta}{\theta_m} - 7.563 \frac{\varphi}{\varphi_m} - 0.389\left(\frac{\theta}{\theta_m}\right)^2 + 3.029\left(\frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^2 - 0.38 \frac{\theta}{\theta_m}, \frac{\varphi}{\varphi_m}; \quad (1)$$

позволила разработать **модель эффективности функционирования БТС жизне-обеспечения молочных коров** с использо-ванием выражения:

$$e = (0.15K + \mathcal{E})/\Pi; \quad (2)$$

где 0,15 — нормативный коэффициент;

K — капиталовложения во все объекты фермы (трансформаторные подстанции, ЛЭП технологическое оборудование), руб./сутки;

$\mathcal{E}$  — эксплуатационные, затраты на произ-водство продукции руб./сутки, которые представляет собой сумму:

$$\mathcal{E} = \mathcal{Z} + \text{И} + \mathcal{Z}_q + a_{\text{пом}}k_{\text{пом}} + a_{\text{от}}k_{\text{от}}; \quad (3)$$

где  $\mathcal{Z}$  — зарплата обслуживающего пер-сона, р/сут.;

И — стоимость кормов, воды, электро-энергии без отопления, р/сут.;

$\mathcal{Z}_q$  — затраты на теплоту, подаваемое отопительно-вентиляционной системой, р/сут.;  $a_{\text{пом}}$  и  $k_{\text{пом}}$  — нормы отчислений на амортизацию и текущий ремонт зданий, сис-тем теплоснабжения, отн.ед.

$\Pi = f(\theta_{вн}, \varphi_{вн})$  — суточная продуктив-ность коров.

Величины k,  $\mathcal{Z}$ , И,  $a_{\text{пом}}$ ,  $k_{\text{пом}}$ ,  $a_{\text{от}}$ ,  $k_{\text{от}}$  будут оставаться постоянными для одного расчет-ного варианта, обозначим их через A, тогда (3) примет вид:

$$e = A + \alpha \left\{ k_0 F + \frac{c(D_{ж}m + D_{и}F_{и})}{\Pi} / \frac{(d_{вн} - d_{н})(\theta_{вн} - \theta_{н}) - mQ_{ж} + 2.4D_{и}F_{и}}{\Pi} \right\}; \quad (4)$$

Модель была принята в качестве крите-рия оптимизации процесса, как минимальная величина стоимости затрат на получение 1 кг молока в сутки при  $\Pi_{\text{max}}$ . Оптимальным будет такой режим работы БТС, при котором для любой комбинации входных нерегули-руемых параметров  $\theta_{н}$ ,  $d_{н}$  будет найдено такое значе-ние регулируемого параметра расхода тепло-ты, при котором e приняло бы минимальное значение при соблюдении ограничений:

$$\Pi = \Pi_{\text{max}}; \theta = \theta_{\text{опт}}; \varphi = \varphi_{\text{опт}}; \text{NH}_3 < 0,02 \text{ мг/л}; \text{CO}_2 < 0,25\%; u < 0,3 \text{ м/с}. \quad (5)$$

Для ведения технологического процесса по оптимальной экономической траектории e(t) необходимо, чтобы в каждый момент времени текущему значению — температуре 14°C — соответствовало значение влажности 70%, при которых обеспечивается минималь-ное значение мгновенных затрат.

Зависимость  $e = f(\theta, P, \varphi)$  будет изобра-жаться поверхностью отклика в четырехмер-ном пространстве (две оси ОР, О $\theta$ ) и осью О $\varphi$ , которую зрительно представить невоз-можно. Однако характер влияния третьей пе-ременной  $\varphi$  можно представить как измене-ние функции  $e = f(\theta, \varphi)$  в зависимости от уровня фактора  $\varphi$ , координаты которого на-ходятся в третьем измерении. Графически это мы представим в виде набора 3-х по-верхностей  $e = f(\theta, P)$  при трех уровнях  $\varphi$  (70, 80, 90%), каждая поверхность является трех-мерным сечением некоторой четырехмерной, описываемой  $e = f(\theta, P, \varphi)$  (рис. 2).

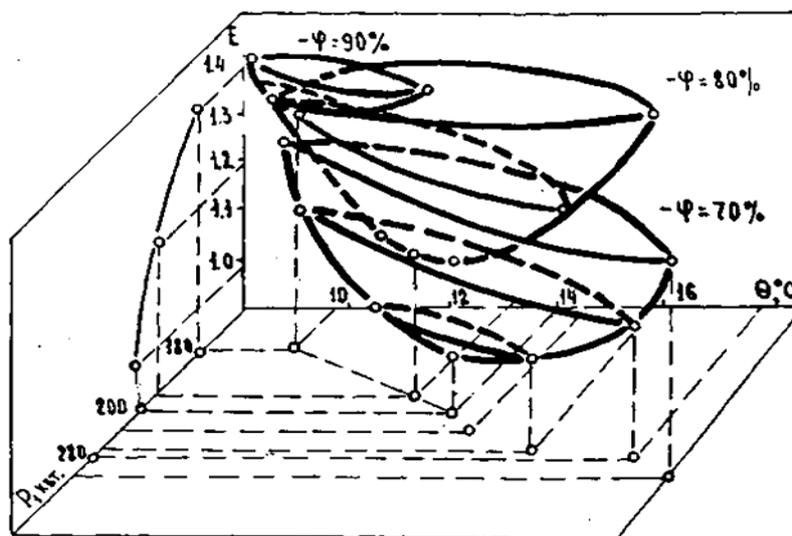


Рисунок 2- Зависимость затрат от температуры, влажности воздушной среды помещения и мощности ЭВОУ при  $\theta_{н} = -18 - -23^{\circ}\text{C}$ .

**РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ БИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
НА ПРИМЕРЕ МОЛОЧНОЙ ФЕРМЫ И СОЛНЕЧНОЙ ТЕПЛИЦЫ  
С ТЕПЛОВЫМИ АККУМУЛЯТОРАМИ**

Откуда видим, что минимуму приведенных затрат также соответствует оптимальная температура 14°C и влажность 70%. Выбор любого значения мощности ВОУ, отличного от мощности установки, соответствующего оптимальным значениям  $\theta$  и  $\varphi$ , вызывает увеличение затрат по сравнению с минимальными.

**СОЛНЕЧНАЯ ТЕПЛИЦА С ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫМ ТЕПЛОВЫМ АККУМУЛЯТОРОМ \***

Одним из перспективных направлений повышения энергетической эффективности теплиц и получения экологически чистых овощей является использование солнечной энергии. Исследования показали [4], что оптимизация элементов конструкции теплицы с аккумулярованием избыточного солнечного тепла в совмещенных с конструкциями теплиц аккумуляторах позволяет снизить энергопотребление и выброс углекислого газа в 2 раза.

Необходимость аккумулярования теплоты в солнечных теплицах обусловлена сезонным дефицитом солнечной радиации и теплопотребления. Поскольку тепловая нагрузка отопления максимальна в декабре-январе, а поступление солнечной энергии в этот период минимально, необходимо накапливать солнечную энергию в благоприятные периоды в аккумуляторах теплоты.

Широко распространенным способом аккумулярования тепловой энергии является использование емкостных аккумуляторов. В них происходят последовательно или одновременно процессы нагревания и охлаждения теплоаккумулирующего материала либо непосредственно за счет солнечной радиации, либо через теплообменник.

Основным недостатком аккумуляторов этого типа является их большая масса. Для 1 ГДж аккумулируемой теплоты потребуются очень большие площади и объемы работ. В качестве теплоаккумулирующего материала в проекте использованы впервые цеолиты, а для сравнения - галька.

\* На выставке EXPO-2010 (Шанхай, КНР, май 2010 г.) Департамента Промышленности ООН разработка вошла в десятку технологий мирового уровня.

**ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ**

Для определения теплотехнических характеристик тепловых аккумуляторов исполь-

зованы методики определения характеристик теплоаккумулирующих насадок, разработанные в [4]. Для расчета аккумулируемого тепла  $Q_{акк}$  использована формула [5]:

$$Q_{акк} = \alpha_H \frac{\pi d_T^2}{4} H' a_V \Delta T_H, \quad (6)$$

где  $\alpha_H$  – коэффициент теплоотдачи с единицы площади (Вт/м<sup>2</sup>\*К),

$0,25\pi d^2 N a_v$  – площадь насадки  $F_H$ , обдуваемая тепловым потоком (м<sup>2</sup>),  $d$  – диаметр массива насадки (м),  $H = 0,5\pi \bar{d}_{cp}$  – длина обтекания зерна (м),  $\Delta T_H$  – разность температуры насадки в начале и в конце аккумулярования тепла, то есть зарядки,

$a_v = 6\psi (1 - \varepsilon) \bar{d}_{cp}$ . Здесь  $\bar{d}_{cp}$  – средний диаметр зерна гальки или цеолита и равен 0,028 м (от 0,02 до 0,04 м),  $\varepsilon$  – порозность насадки, для гальки 0,54, для цеолита 0,56 ( $\bar{d}_{cp}$  и  $\varepsilon$  определены экспериментально в [4]),  $\psi$  – коэффициент формы зерна, для гальки 1,12, для цеолита 2,14.

После преобразований и подстановок параметров в формулу расчета аккумулируемого тепла  $Q_{акк}$ , (подробно весь этот процесс приведен в [4]) получено соотношение, которое позволяет определить оптимальный режим аккумуляции тепла в насадках при разных значениях массового расхода воздуха  $G$  (кг/м<sup>2</sup> ч) и скорости воздушного потока  $V$  (м/с) для различных сочетаний параметров слоя и насадки:  $\varepsilon$ ,  $\bar{d}_{cp}$ ,  $\psi$ ,  $\rho_n$ ,  $c_n$ , где  $\rho_n$  – плотность, а  $c_n$  – удельная теплоемкость материала насадки:

$$Q_{акк} = 5,69 \sqrt{\frac{V}{\varepsilon}} [\psi(1 - \varepsilon)]^{0,25} \times \frac{c_g 3600}{c_n \rho_n} \frac{G}{\bar{d}_{cp}} \Delta T; \quad (7)$$

После подстановки в это уравнение значений удельных теплоемкостей воздуха и насадки ( $c_v$ ,  $c_n$ ), плотности  $\rho_n$  гальки и цеолита получены формулы аккумулируемого тепла для гальки и цеолита [4].

В результате теоретических и экспериментальных исследований получена формула энергетической эффективности  $E$  теплового аккумулятора (ТА):

$$E = \frac{4,6 \cdot 10^7 \varepsilon^{2,5} \bar{d}_{cp}^{0,2} \Delta T}{c_n \rho_n H V^{1,3} [(1 - \varepsilon) \psi]^{0,75} \Delta \tau}; \quad (8)$$

параметры которой имеют вышеприведенные значения, а  $\Delta \tau$  – разность времени. Полученная формула позволяет сравнивать между собой различные варианты ТА еще на стадии

проектирования с различными параметрами насадки ( $\epsilon$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ,  $\rho_n$ ,  $c_n$ ), геометрией слоя ( $H$ ,  $F$ ) и скоростями движения теплоносителя ( $V$ ).

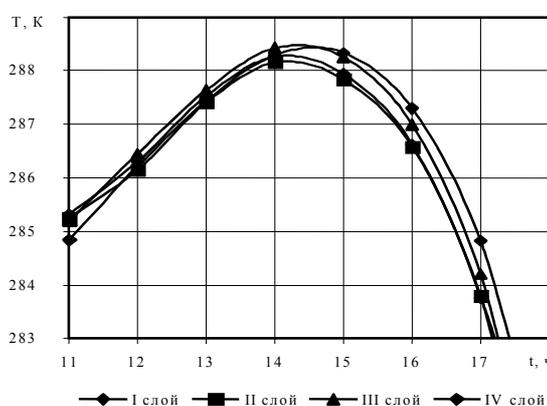
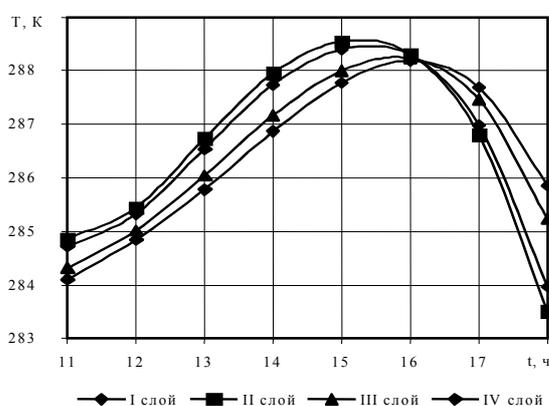
Оптимизация режима работы теплового аккумулятора

Для поиска наиболее рациональной конструкции аккумулятора, а также выбора аэродинамического режима его работы определены с помощью полученных формул (с точки зрения аккумуляирования теплоты) оптимальные параметры насадки, скорость движения теплоносителя, при которых энергетические затраты будут наименьшими, а теплосъем наибольший [4].

Рациональным можно считать режим работы ТА с насадками с порозностью 0,54–0,60, с коэффициентом формы зерна 1–2, диаметром частиц 0,02–0,04 м, скоростями

воздушного потока 0,6–1,0 м/с. Каждый параметр насадки имеет свой энергетический оптимум. Самый высокий энергетический оптимум у цеолита при  $\psi = 1,25$ ,  $\epsilon = 0,56$ ,  $V = 0,6$  м/с,  $\rho = 2500$  кг/м<sup>3</sup>,  $E = 2,39$ , что на 30% выше максимального  $E$  гальки. Этот факт подтверждает более высокую энергетическую эффективность пористых тел [1].

Зависимость температуры насадки по четырем слоям за время аккумуляции (рис. 3) построена по расчетным данным [4]. Видно, что динамика изменения температуры по слоям насадки цеолита и гальки в зависимости от времени аккумуляирования неодинакова. У цеолита в слое 2 температура выше, и наблюдается больший температурный градиент, чем у гальки.



а) - насадка цеолиты;

б) -насадка галька;

Рисунок 3 - Кривые зависимости температуры насадки по слоям от времени аккумуляирования  $t$ .

Если сравнить экспериментальные данные с расчетными, то максимальный перепад температур  $\Delta T$  в начале и в конце зарядки составил для цеолита 4,3 и 4,5 К соответственно, а для гальки 3 и 3,2 К соответственно.

По данным эксперимента получены зависимости температуры выходящего воздуха в режиме разрядки:

$$T_{\text{вых}} = 3,63(0,332T_{\text{нас}} - 0,057T_{\text{нар}}) \quad (9)$$

для гальки и

$$T_{\text{вых}} = 2,27(0,497T_{\text{нас}} - 0,057T_{\text{нар}}) \quad (10)$$

для цеолитов.

В режиме зарядки температура насадки зависит от начальной температуры и температуры входящего воздуха следующим образом:

$$T_{\text{нас}} = 1,19T_{\text{нас0}} + 0,19T_{\text{вх}}; \quad (11)$$

для гальки и

$$T_{\text{нас}} = 1,13T_{\text{нас0}} + 0,13T_{\text{вх}}; \quad (12)$$

для цеолита

Для аккумуляирования тепла на одни сутки в теплице площадью 100 м<sup>2</sup> необходим ТА объемом 5 м<sup>3</sup> с насадкой галька. Установлено экспериментально и теоретически [4], что 1 м<sup>3</sup> (1100 кг) ТА с насадкой галька аккумуляирует в среднем за день 5 МДж, а с насадкой цеолиты 1 м<sup>3</sup> (968 кг) – 8,5 МДж. Объем ТА с насадкой цеолит для аккумуляирования тепла в течение суток составит 2,9 м<sup>3</sup> – что в 1,72 раза меньше, чем в случае применения гальки (5 м<sup>3</sup>) и расход электроэнергии за год для ТА объемом 2,9 м<sup>3</sup> составит 1068,76 кВтч, а для 5 м<sup>3</sup> – 1968,64 кВтч.

Создание ТА, реализуемых по современной технологии, экономически оправданных, простых и надежных в эксплуатации позволяет значительно расширить объемы использования солнечной энергии. При этом в АПК сэкономятся большое количество органического топлива как в тепличных хозяйствах, так и в животноводческих помещениях.

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ БИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
НА ПРИМЕРЕ МОЛОЧНОЙ ФЕРМЫ И СОЛНЕЧНОЙ ТЕПЛИЦЫ  
С ТЕПЛОВЫМИ АККУМУЛЯТОРАМИ

ВЫВОДЫ

Разработанный метод моделирования биотехнической системы жизнеобеспечения молочных коров позволяет обосновать технические требования и рациональные режимы работы вентиляционно-отопительной установки (ВОУ). Выбор любого значения мощности ВОУ, отличного от оптимальных значений  $\theta_{вн}$  и  $\varphi_{вн}$ , вызывает увеличение затрат по сравнению с минимальными до 8-10%.

Разработан метод создания энергоэффективной солнечной теплицы [3,4] заключающийся в оптимально рассчитанной конструкции всех элементов теплицы, совмещенных с тепловыми аккумуляторами, что позволяет обеспечить максимальный приход солнечной радиации в отопительный период.

Разработанная методика определения теплопроизводительности пассивных солнечных систем позволила получить инженерные уравнения расчета температуры внутри теплицы по сезонам года.

Разработан экспериментально-статистический метод расчета энергоэффективности тепловых аккумуляторов с теплоаккумулирующими насадками. В результате получено уравнение, учитывающее влияние семи переменных на количество аккумулируемого тепла, позволяющее определить наиболее оптимальный режим аккумуляции тепла в насадках. Уравнение позволяет также рассчитать оптимальную геометрию слоя: высоту  $H$ , поперечное сечение аккумулятора  $F$ ,

что ранее в уравнениях энергетического баланса не учитывалось.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малых В.В, Тайсаева В.Т., Ажичаков, Ю. В. Разработка энергоэффективной экологически чистой фермы-теплицы для личного подсобного хозяйства/Возобновляемые источники энергии для устойчивого развития Байкальского региона: материалы II международной научной конференции/под ред.В.Т.Тайсаевой. – Улан-Удэ: БГСХА, 2004.
2. Тайсаева В. Т. Моделирование энергоэффективной солнечной теплицы / Механизация и электрификация сельского хозяйства: вып. № 10.- 2007.
3. Тайсаева В. Т. Расчёт энергетических характеристик систем солнечного теплоснабжения жилого дома в условиях Забайкалья. /Вестник БГСХА: вып. № 2.- Улан-Удэ: --/БГСХА, 2007.
4. Разработка и изготовление опытных образцов солнечных коллекторов с теплоносителем вода и воздух на базе композитов из местного сырья и отходов производства. – Отчет НИОКР, Улан-Удэ, 2001. Инв. № 02.200.202236. Рег. № 01200204215.
5. Авезов Р.Р., Орлов А.Д. Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения. – Ташкент: ФАН, 1988.

**Тайсаева В.Т.** – БГСХА им. В.Р. Филиппова, д.т.н., профессор,

*E-mail: solar\_en@bgsha.ru,*

*тел. (3012)446241*

**Мазеев Л.Р.** - БГСХА им. В.Р. Филиппова, к.т.н.,

*E-mail: solar\_en@bgsha.ru*