Методика расчёта энергии и работы при взаимодействии объектов в системе «Ч-М-Ж/[С]»

***В.А. Шахов**, д.т.н., профессор, **С.Г. Махиня**, аспирант, **А.Ю. Бабков**, аспирант, **Е.В. Вагенлейтнер**, аспирант, ФГБОУ ВПО Оренбургский ГАУ; **С.А. Соловьёв**, д.т.н., профессор, ФГБНУ ГОСНИТИ*

Импульс есть такая величина, передача которой от объекта к объекту характеризует механическое взаимодействие. Последнее имеет направленный характер, а поэтому импульс есть вектор. Однако взаимодействие между объектами может иметь не только механический характер. Если говорить о взаимодействии объектов в более широком смысле, то естественно допустить, что оно характеризуется тоже передачей какой-то величины, но имеющей скалярную природу, поскольку взаимодействие объектов может иметь и ненаправленный характер. Действительно, в природе имеется такая величина и называется энергией [1, 2].

Уравнение энергии системы представим следующим образом:

$$\frac{dE}{dT} = N_{внеш} + N_{внутр}^{непот}, \quad (1)$$

где E – энергия системы, Дж;

t – время, с;

$N_{внеш}$ – мощность внешних сил, Вт;

$N_{внутр}$ – мощность внутренних сил, Вт,

т.е. производная механической энергии объекта по времени равна алгебраической сумме мощностей всех внешних сил и всех внутренних непотенциальных сил. Значит, в инерциальной системе отсчёта механическая энергия замкнутой системы частиц, в которой нет непотенциальных сил, сохраняется в процессе движения:

$$E = E_{мин} + U = const, \quad (2)$$

где $E_{мин}$ – минимальная энергия системы, Дж;

U – мощность внутренних и внешних сил, Вт.

В частности, механическая энергия БТС «Ч-М-Ж/[С]» может сохраняться неизменной, но это происходит лишь в тех случаях, когда согласно уравнению (1) уменьшение этой энергии за счёт работы против внутренних диссипативных сил компенсируется поступлением энергии за счёт работы внешних сил. Согласно вышеизложенному, элементарная работа, совершаемая силой $\overline{F}$ в БТС на перемещении $d\overline{r}$, равна [3]:

$$dA = \overline{F} d\overline{r} = F\cos\alpha \cdot dt = F_x dt, \quad (3)$$

где A – работа системы, Дж;

F – сила направленного действия, Н.

Значит, работа, совершаемая силой $\overline{F}$ при доении животного в период времени t (рис.), равна алгебраической сумме элементарных работ на отдельных бесконечно малых участках:

$$A = \int_0^s F \cos\alpha \cdot ds = \int_0^s F_x ds\,. \qquad (4)$$

Для вычисления этого интеграла надо знать зависимость:

$$F_t = f(\upsilon_M)\,, \qquad (5)$$

где υ_M – скорость молокоотдачи, кг/с.

Следовательно, работа, совершаемая силой $\overline{F}$ на пути 0-t, численно измеряется площадью, заштрихованной на рисунке.

Используя закон сохранения энергии, принимаем, что БТС работает стабильно, а величины затрачиваемой работы машины ($A_м$) и человека ($A_ч$) постоянные (рис.). Работа, совершаемая животным ($A_ж$) при доении, изменяется и равна сумме элементарных работ ($\Delta A_{жi}$) за время лактации:

$$\sum_{i=1}^{n} A_{ж} = \sum_{i=1}^{n} \Delta A_{жi} = f(A_{ж})\,, \qquad (6)$$

где $A_ж$ – работа животного в период лактации, Дж;

n – число доек;

i – порядковый номер дойки;

$\Delta A_{жi}$ – элементарная работа разовой дойки, Дж.

Работа, совершаемая животным при доении, зависит от работы доильной машины и характеризуется эффективностью молоковыведения, условиями взаимодействия сосков с сосковой резиной и величиной «наползания» доильных стаканов на соски вымени [2, 4]:

$$A_Д = K_Э \int_{t_1}^{t_2} \int_0^K Skj(R_{cj}) S dt\,, \qquad (7)$$

где $A_Д$ – работа доильной машины при доении, Дж;

$K_Э$ – коэффициент энергоэффективности, $(0 < K_Э < 1)$;

t_1, t_2 – время начала и окончания доения, с;

K – число доильных стаканов;

Skj – площадь контакта соска с сосковой резиной, м^2;

j – число сосков;

R_{cj} – реакция соска при воздействии сосковой резины, Па;

S – величина «наползания» доильного стакана на сосок вымени, м;

t – лактационный период, с.

Полная работа за весь период лактации равна сумме элементарных работ животного и доильной машины на отдельных бесконечно малых участках (дойках) на площади $Sл$:

$$A = A_Д \int_0^{Sл} f(Aж) dt\,, \qquad (8)$$

где A – полная работа за время лактации, Дж;

$Sл$ – площадь под дифференциальной кривой лактации, м^2.

В данном случае (рис.) работа по графику молокоотдачи является положительной, а получаемое в результате этого молоко содержит потенциальную энергию [5].

В замкнутой системе элементов, силы взаимодействия между которыми консервативны (потенциальны), отсутствуют взаимные превращения механической энергии в другие виды энергии. Такие системы называются замкнутыми консервативными, к ним относятся подсистемы биотехнической

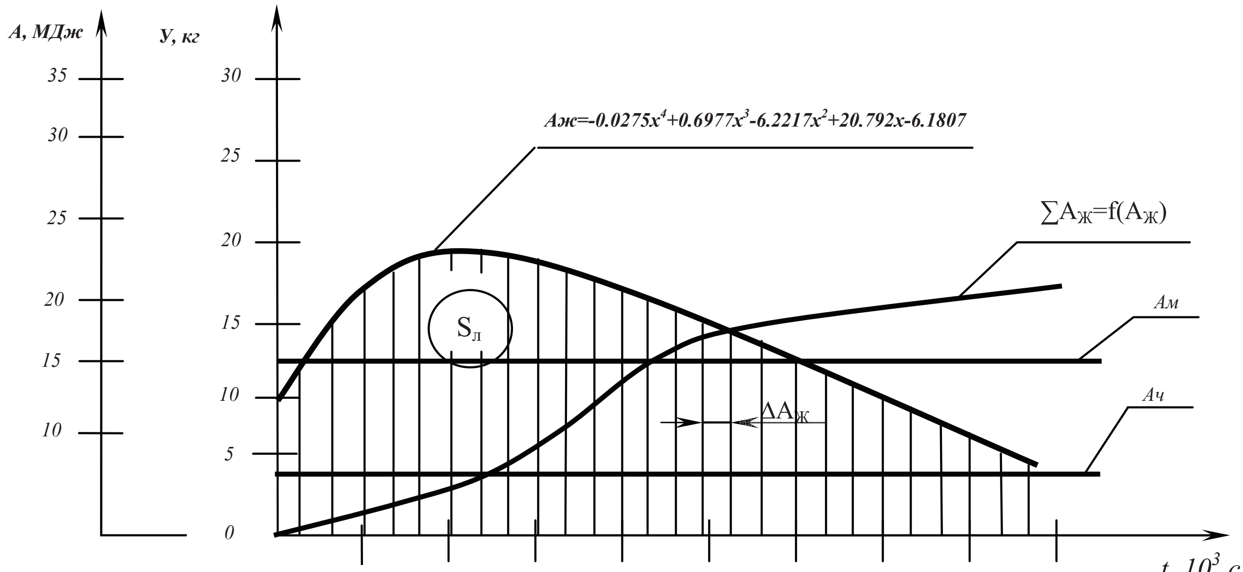

Рис. – Модель энергоэффективного функционирования БТС: *Ам*, *Ач*, *Аж* – работа, совершаемая машиной, человеком и животным в период лактации, МДж; *Sл* – площадь под дифференциальной кривой, м^2

системы «Ч-М-Ж/[С]». Для них справедлив закон сохранения энергии в механике: механическая энергия замкнутой консервативной системы не изменяется в процессе её существования:

$$W = E_k + E_n = const, \qquad (9)$$

где E_n – кинетическая энергия;

E_k – потенциальная энергия.

Рассмотрим подсистему доения животных [1, 3]. Представим её в виде материальных точек массами m_1, m_2, ... , m_n, движущихся со скоростями $\overline{v_1}, \overline{v_2}, ..., \overline{v_n}$. Пусть $\overline{F_1^{/}}, \overline{F_2^{/}}, ..., \overline{F_n^{/}}$ – равнодействующие внутренних консервативных сил, действующие на каждую из этих точек, а $\overline{F_1^{/}}, \overline{F_2^{/}}, ..., \overline{F_n^{/}}$ – равнодействующие внешних сил, которые также будем считать консервативными. Кроме того, будем считать, что на материальные точки действуют ещё и внешние неконсервативные силы. Равнодействующие этих сил, действующих на каждую из материальных точек, обозначим $\overline{f_1}, \overline{f_2}, ..., \overline{f_n}$.

Тогда, учитывая, что $\overline{v_i} = \frac{d\overline{r_i}}{dt}, d\overline{r_i} = \overline{v_i}dt$, по второму закону Ньютона получим:

$$\begin{cases} m_1(\overline{v_1}d\overline{v_1}) - (\overline{F_1^{/}} + \overline{F_1})d\overline{r_1} = \overline{f}_1 d\overline{r_1}; \\ m_2(\overline{v_2}d\overline{v_2}) - (\overline{F_2^{/}} + \overline{F_2})d\overline{r_2} = \overline{f}_2 d\overline{r_2}; \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ m_n(\overline{v_n}d\overline{v_n}) - (\overline{F_n^{/}} + \overline{F_n})d\overline{r_n} = \overline{f}_n d\overline{r_n}. \end{cases} \qquad (10)$$

Складывая эти уравнения, получим:

$$\sum_{i=1}^{n} m_i\left(\overline{v_i}d\overline{v_i}\right) - \sum_{i=1}^{n}\left(\overline{F_i^{/}} + \overline{F_i}\right)d\overline{r_i} = \sum_{i=1}^{n}\overline{f}_i d\overline{r_i}. \qquad (11)$$

Первый член левой части уравнения (11) представляет собой приращение кинетической энергии системы:

$$\sum_{i=1}^{n} m_i\left(\overline{v_i}d\overline{v_i}\right) = \sum_{i=1}^{n} d\left(\frac{m_i\overline{v_i}^2}{2}\right) = dE_k. \qquad (12)$$

Второй член $\sum_{i=1}^{n}\left(\overline{F_i^{/}} + \overline{F_i}\right)d\overline{r_i}$ равен элементарной работе внутренних и внешних консервативных сил, т.е. равен элементарному приращению потенциальной энергии *dEк*.

Правая часть уравнения (11) задаёт работу внешних неконсервативных сил, действующих на подсистему. Таким образом, имеем:

$$d\left(E_k + E_n\right) = dA. \qquad (13)$$

При переходе подсистемы из состояния 1 в какое-либо состояние 2 получим:

$$\int_1^2 d\left(E_k + E_n\right) = A_{12}, \qquad (14)$$

т.е. изменение полной механической энергии подсистемы при переходе из одного состояния в другое равно работе, совершённой при этом внешними неконсервативными силами.

Если внешние неконсервативные силы отсутствуют, то из выражения (13) следует, что:

$$d\left(E_k + E_n\right) = 0; \qquad (15)$$

откуда:

$$E_k + E_n = W = const, \qquad (16)$$

В общем случае потенциальная энергия подсистемы изменяется и может иметь достаточно сложный вид, например с несколькими максимумами и минимумами.

При изменении состояния объекта в подсистеме в результате малых возмущений происходит изменение устойчивого равновесия, приводящее к изменению энергии. При максимальном значении $E_{пmax}$ подсистемы возникает неустойчивое равновесие, так как при малых возмущениях появляется сила, стремящаяся сместить её из этого положения. Таким образом, в состоянии устойчивого равновесия замкнутой консервативной подсистемы её потенциальная энергия имеет минимальное значение, а в состоянии неустойчивого равновесия – максимальное значение.

Из вышеизложенного следует, что для оптимального функционирования системы «Ч-М-Ж/[С]» необходимо наименьшее внешнее воздействие, при этом стабилизируются внутренние процессы в подсистемах. В конечном итоге это приводит к выполнению максимальной работы системы, а значит, наименьшим затратам на производство продукции.

Литература

1. Артюшин А.А., Свентицкий И.И. и др. Биоэнергетическое начало высокоэффективных («точных») технологий животноводства // Энергосберегающие технологии в животноводстве и стационарной энергетике: труды V междунар. науч.-технич. конф. Ч. 3. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. С. 10–17.
2. Степанов А.Н. Энергоинформационный подход к оценке состояния биообъекта при создании ресурсосберегающих технологий // Энергосберегающие технологии в животноводстве и стационарной энергетике: труды IV Междунар. науч.-технич. конф. Ч. 3. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2005. С. 337–341.
3. Шахов В.А. Методика энергоаудита биотехнических систем в животноводстве // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. 2011. № 1.
4. Шахов В.А. Методология проектирования доильного оборудования // Вестник Оренбургского государственного университета. 2006. № 10.
5. Асманкин Е.М., Асманкин А.М., Соловьёв С.А., и др. Моделирование процесса отдачи молока животным // Техника в сельском хозяйстве. 1998. № 5. С. 11–12.