УДК 631.363.1:631.363.7

С. Ю. БУЛАТОВ, А. И. СВИСТУНОВ

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС СМЕСИТЕЛЯ-ФЕРМЕНТЕРА КОРМОВ

Ключевые слова: *количество теплоты, конструктивно-технологические параметры, смеситель-ферментер, теоретические зависимости, тепловой баланс.*

Аннотация. *Проведены теоретические исследования и предложена зависимость, позволяющая определить температуру питательной среды, исходя из конструктивных параметров смесителя-ферментера кормов.*

Нами разработан смеситель-ферментер кормов, который позволяет получить корма с высоким содержанием белка из малоценного сырья.

Особенностью технологии смешивания и ферментации кормов является необходимость поддержания оптимальной температуры питательной среды. Поэтому нами проведены теоретические исследования по влиянию конструктивных параметров смесителя-ферментера на температуру.

Для определения количества теплоты, необходимой для поддержания оптимальной температуры питательной среды в смесителе-ферментере на всем протяжении процесса ферментации, рассмотрим его конструктивные особенности. Смеситель (рис. 1) представляет из себя цилиндр с толщиной стенки $\delta_{\text{ст}} = R_2 - R_1$, который охвачен нагревательной рубашкой. Угол обхвата цилиндра рубашкой составляет φ. Для снижения потерь теплоты сверху нанесен слой изоляции толщиной $\delta_{\text{из}} = R_4 - R_3 = R_5 - R_2$. Длина цилиндра равна L.

Элементарное количество теплоты $dQ_{нагр}$, выделившееся от нагревательного элемента, определится по выражению

$$dQ_{нагр} = Pd\tau, \tag{1}$$

где P – мощность нагревательного элемента, Вт;

$d\tau$ – время нагрева воды, с.

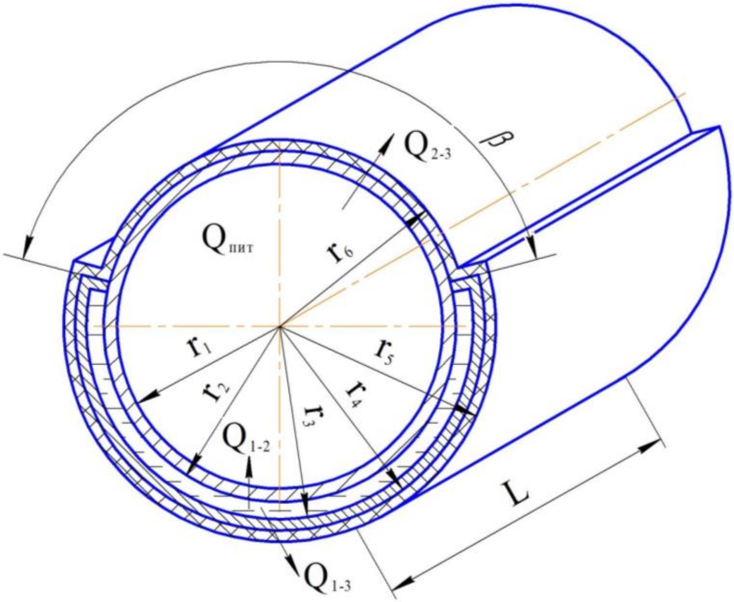

Рисунок 1 – Схема к определению теплового потока

В то же время это количество теплоты расходуется на нагрев питательной среды и частично проходит через слой изоляции к наружному воздуху:

$$dQ_{нагр} = dQ_{1-3} + dQ_{1-2}. \tag{2}$$

Составляющие dQ_{1-3} и dQ_{1-2} находятся по формулам Фурье для цилиндрических стенок:

$$dQ = -\lambda \cdot \frac{dT}{dr} \cdot dS \cdot d\tau. \tag{3}$$

Тогда составляющие dQ_{1-3} и dQ_{1-2} при граничных условиях третьего рода:

$$dQ_{1-3} = k_1 \cdot \left(T_1 - T_3\right) \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{360-\beta}{180} \cdot d\tau; \tag{4}$$

$$dQ_{1-2} = k_2 \cdot \left(T_1 - T_2\right) \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{360-\beta}{180} \cdot d\tau, \tag{5}$$

где k_1, k_2 – коэффициенты теплопередачи, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$;

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_3 r_3} + \frac{1}{\lambda_1}\ln\frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{\lambda_{из}}\ln\frac{r_5}{r_4} + \frac{1}{\alpha_{из} r_5}};$$

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 r_2} + \frac{1}{\lambda_1}\ln\frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\alpha_2 r_2}};$$

λ_1 – коэффициент теплопроводности металлической стенки, $\frac{Вт}{м \cdot К}$;

$\lambda_{из}$ – коэффициент теплопроводности изоляции, $\frac{Вт}{м \cdot К}$;

T_3 – температура воздуха (принимаем T_3 = const), К;

T_1, T_2 – температуры воды в нагревательной рубашке и питательной среды соответственно (зависят от времени τ: $T_1 = T_1(\tau)$, $T_2 = T_2(\tau)$), К.

Элементарное количество теплоты dQ_{1-2} расходуется на нагрев питательной среды $dQ_{пит}$, а частично проходит через торцевые стенки $dQ_{бок}$ и поверхность площадью $\pi r_1 L \frac{\beta}{180}$:

$$dQ_{1-2} = m_{п.с.} \cdot c_{п.с.} \cdot dT_2 + k_3 \cdot (T_2 - T_3) \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{\beta}{180} \cdot d\tau + k_4 \cdot (T_2 - T_3) \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot d\tau, \tag{6}$$

где $m_{п.с.}$ – масса питательной среды, кг;

$c_{п.с.}$ – теплоемкость питательной среды, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$;

dT_2 – изменение температуры питательной среды, К.

$$k_3 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 r_1} + \frac{1}{\lambda_1}\ln\frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_{из}}\ln\frac{r_6}{r_2} + \frac{1}{\alpha_{из} r_6}}; \quad k_4 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{м.с.}}{\lambda_1} + \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} + \frac{1}{\alpha_{из}}}.$$

Но в процессе ферментации бактерии также выделяют тепло. Тогда выражение (4) примет вид:

$$dQ_{1-2} = m_{п.с.} \cdot c_{п.с.} \cdot dT_2 + \left(k_3 \cdot (T_2 - T_3) \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{\beta}{180} + k_4 \cdot (T_2 - T_3) \cdot \pi \cdot r_1^2 - Q_{бак}\right) \cdot d\tau. \tag{7}$$

Составляем систему уравнений, подставляя выражения (4) и (5) в (2) с учетом (1) и (6):

$$\begin{cases} P\cdot d\tau = k_1\cdot\left(T_1-T_3\right)\cdot\pi\cdot L\cdot\dfrac{360-\beta}{180}\cdot d\tau + k_2\cdot\left(T_1-T_2\right)\cdot\pi\cdot L\cdot\dfrac{360-\beta}{180}\cdot d\tau; \\ k_2\cdot\left(T_1-T_2\right)\cdot\pi\cdot L\cdot\dfrac{360-\beta}{180}\cdot d\tau = \\ = m_{п.с.}\cdot c_{п.с.}\cdot dT_2 + \left(k_3\cdot\left(T_2-T_3\right)\cdot\pi\cdot L\cdot\dfrac{\beta}{180} + k_4\cdot\left(T_2-T_3\right)\cdot\pi\cdot r_1^2 - Q_{бак}\right)\cdot d\tau. \end{cases} \quad (8)$$

Сокращаем на $d\tau$, получим:

$$\begin{cases} P = k_1\cdot\left(T_1-T_3\right)\cdot\pi\cdot L\cdot\dfrac{360-\beta}{180} + k_2\cdot\left(T_1-T_2\right)\cdot\pi\cdot L\cdot\dfrac{360-\beta}{180}; \\ k_2\cdot\left(T_1-T_2\right)\cdot\pi\cdot L\cdot\dfrac{360-\beta}{180} = m_{п.с.}\cdot c_{п.с.}\cdot\dfrac{dT_2}{d\tau} + k_3\cdot\left(T_2-T_3\right)\cdot\pi\cdot L\cdot\dfrac{\beta}{180} + \\ \qquad + k_4\cdot\left(T_2-T_3\right)\cdot\pi\cdot r_1^2 - Q_{бак}. \end{cases} \quad (9)$$

Из первого уравнения системы (9) выразим температуру T_1. Для начала сгруппируем члены уравнения при одинаковых температурах:

$$P = k_1\cdot\pi\cdot L\cdot\frac{360-\beta}{180}T_1 - k_1\pi\cdot L\cdot\frac{360-\beta}{180}T_3 + k_2\cdot\pi\cdot L\cdot\frac{360-\beta}{180}T_1 - k_2\cdot\pi\cdot L\cdot\frac{360-\beta}{180}T_2;$$

$$P = \left(k_1+k_2\right)\cdot\pi\cdot L\cdot\frac{360-\beta}{180}T_1 - \left(k_1T_3+k_2T_2\right)\cdot\pi\cdot L\cdot\frac{360-\beta}{180}.$$

Отсюда выражаем искомую температуру:

$$T_1 = \frac{\left(P + \left(k_1T_3+k_2T_2\right)\cdot\pi\cdot L\cdot\dfrac{360-\beta}{180}\right)\cdot 180}{\left(k_1+k_2\right)\cdot\pi\cdot L\cdot\left(360-\beta\right)}.$$

Проводим преобразования:

$$T_1 = \frac{P + \left(k_1T_3+k_2T_2\right)\cdot\pi\cdot L\cdot\left(360-\beta\right)}{\left(k_1+k_2\right)\cdot\pi\cdot L\cdot\left(360-\beta\right)} = \\ = \frac{P}{\left(k_1+k_2\right)\cdot\pi\cdot L\cdot\left(360-\beta\right)} + \frac{\left(k_1T_3+k_2T_2\right)}{\left(k_1+k_2\right)}. \quad (10)$$

Неизвестную температуру T_2 выражаем из второго уравнения системы (9), учитывая выражение (10).

$$\frac{Pk_2}{\left(k_1+k_2\right)} + \frac{k_2k_1\cdot\pi\cdot L}{\left(k_1+k_2\right)}\cdot\frac{360-\beta}{180}T_3 + \frac{k_2k_2\cdot\pi\cdot L}{\left(k_1+k_2\right)}\cdot\frac{360-\beta}{180}T_2 - k_2\cdot\pi\cdot L\cdot\frac{360-\beta}{180}T_2 = \\ = m_{п.с.}\cdot c_{п.с.}\cdot\frac{dT_2}{d\tau} + k_3\cdot\pi\cdot L\cdot\frac{\beta}{180}\cdot T_2 - k_3\cdot\pi\cdot L\cdot\frac{\beta}{180}\cdot T_3 + k_4\cdot\pi\cdot r_1^2\cdot T_2 - k_4\cdot\pi\cdot r_1^2 T_3 - \\ - Q_{бак}\ . \quad (11)$$

Из уравнения (11) выражаем $\frac{dT_2}{d\tau}$:

$$\frac{dT_2}{d\tau} = \left(\left(\frac{k_2^2}{(k_1+k_2)} - k_2 \right) \cdot \frac{(360-\beta)}{180} - k_3 \cdot \frac{\beta}{180} + \frac{k_4 \cdot r_1^2}{L} \right) \frac{\pi \cdot L}{m_{п.с.} \cdot c_{п.с.}} \cdot T_2 +$$
$$+ \left(\frac{k_2 k_1}{(k_1+k_2)} \cdot \frac{360-\beta}{180} + k_3 \cdot \frac{\beta}{180} + \frac{k_4 \cdot r_1^2}{L} \right) \frac{\pi \cdot L}{m_{п.с.} \cdot c_{п.с.}} T_3 +$$
$$+ \left(\frac{Pk_2}{(k_1+k_2)} + Q_{бак} \right) \frac{1}{m_{п.с.} \cdot c_{п.с.}}. \quad (12)$$

Произведем замену и подставим в (12):

$$b = \left(\frac{k_2^2}{(k_1+k_2)} - k_2 - \frac{k_3\beta}{360-\beta} - \frac{180 k_4 r_1^2}{(360-\beta)L} \right) \frac{(360-\beta)\pi L}{180 m_{п.с.} c_{п.с.}};$$
$$c = \left(\frac{k_2 k_1}{(k_1+k_2)} \cdot \frac{360-\beta}{180} + k_3 \cdot \frac{\beta}{180} + \frac{k_4 \cdot r_1^2}{L} \right) \frac{\pi L}{m_{п.с.} c_{п.с.}} T_3 + \left(\frac{Pk_2}{(k_1+k_2)} + Q_{бак} \right) \frac{1}{m_{п.с.} \cdot c_{п.с.}}. \quad (13)$$

$$\frac{dT_2}{d\tau} = bT_2 + c. \quad (14)$$

$$\frac{dT_2}{bT_2 + c} = d\tau. \quad (15)$$

Представим:

$$b \cdot T_2 + c = y. \quad (16)$$

$$b \cdot dT_2 = dy. \quad (17)$$

Тогда: $\frac{1}{b} \frac{dy}{y} = d\tau.$

$$\ln y = b\tau + const. \quad (18)$$

$$y = y_0 e^{b\tau}. \quad (19)$$

$$y_0 = y\big|_{\tau=0} = y(T_2 = T_{2нач}). \quad (20)$$

$$y_0 = \left(\left(\frac{k_2^2}{(k_1+k_2)} - k_2 - \frac{k_3\beta}{360-\beta} - \frac{180k_4r_1^2}{(360-\beta)L} \right) \frac{(360-\beta)\pi L}{180m_{п.с.}c_{п.с.}} \right) \cdot T_{2нач} +$$
$$+ \left(\frac{k_2k_1}{(k_1+k_2)} \cdot \frac{360-\beta}{180} + k_3 \cdot \frac{\beta}{180} + \frac{k_4 \cdot r_1^2}{L} \right) \frac{\pi L}{m_{п.с.}c_{п.с.}} T_3 +$$
$$+ \left(\frac{Pk_2}{(k_1+k_2)} + Q_{бак} \right) \frac{1}{m_{п.с.} \cdot c_{п.с.}} \ . \tag{21}$$

Подставляя (19) с учетом (21) и (13) в (16), можно получить температуру T_2.

Таким образом, зная конструктивные параметры смесителя-ферментера, можно определить искомую температуру питательной среды в заданный промежуток времени и количество энергозатрат, потребных для ее поддержания при заданных параметрах установки.

THERMAL BALANCE
OF THE AMALGAMATOR-FERMENTER OF FORAGES

Keywords: *quantity of heat, constructive-technological data, the amalgamator-fermenter, theoretical dependences, heat balance.*

Annotation. *Theoretical researches are carried out and the dependence, allowing defining temperature of a nutrient medium, proceeding from design data of the amalgamator-ферментера of forages is offered.*

БУЛАТОВ СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры «Тракторы и автомобили», Нижегородский государственный инженерно-экономический институт, Россия, Княгинино (bulatov_sergey_urevich@mail.ru).

BULATOV SERGEI YUR'EVICH – the candidate of technical sciences, the senior lecturer of the chair «Tractors and automobiles», Nizhniy Novgorod state engineering-economic institute, Russia, Knyaginino (bulatov_sergey_urevich@mail.ru).

СВИСТУНОВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ – аспирант, Нижегородский государственный инженерно-экономический институт, Россия, Княгинино (kng_almas@mail.ru).

SVISTUNOV ALEKSANDR IVANOVICH – the post-graduate student, Nizhniy Novgorod state engineering-economic institute, Russia, Knayginino (kng_almas@mail.ru).