

Сулов Д.Ю., канд. техн. наук, доц.

Темников Д.О., студент

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС БИОРЕАКТОРА С БАРБОТАЖНЫМ ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ БИОМАССЫ\*

suslov1687@mail.ru

Составлен тепловой баланс биореактора, учитывающий количество тепла, поступающего в биореактор в процессе барботажного перемешивания биомассы и выделяющегося в процессе экзотермической реакции анаэробной ферментации. Полученные уравнения позволяют определить площадь поверхности теплообмена и конструктивные параметры теплообменного оборудования в форме змеевика.

**Ключевые слова:** биогаз, биореактор, тепловой баланс, барботажное перемешивание.

**Введение.** В связи с введением экономических санкций в Российской Федерации принята программа импортозамещения, в рамках которой планируется реализация проектов по производству свинины, мяса птицы, выращиванию зерновых, плодовых и ягодных культур. Однако это влечет появление экологических проблем утилизации органических отходов этих производств. В зарубежной практике для переработки отходов широкое применение получили биогазовые станции. [1-3]. В биогазовых установках в результате анаэробной ферментации происходит переработка отходов и получение высокоэффективных биоудобрений и источника энергии - биогаза, что также решает агробиологические и энергетические проблемы сельскохозяйственных предприятий.

Одним из основных факторов, влияющих на эффективность процесса получения биогаза, является температура бродильной массы в биореакторе. Известно, что процесс анаэробной ферментации очень чувствителен к перепадам температуры, поэтому на протяжении всего процесса необходимо поддерживать постоянную температуру биомассы [4-6].

Для поддержания температуры в реакторах получения биогаза широкое применение получили теплообменные аппараты поверхностного типа - теплообменники, выполненные в форме змеевика [7,8].

**Методы.** В работе использовались методы математического моделирования гидродинамических и теплообменных процессов, протекающих в биореакторе и теплообменном оборудовании.

**Основная часть.** Целью расчета теплообменников является определение площади поверхности теплообмена  $F_m$  ( $m^2$ ), которая зависит от тепловой нагрузки аппарата  $Q_m$  (Вт) и определяется из основного уравнения теплопередачи [9,10]:

$$Q_m = k_m \cdot F_m \cdot \Delta t_{cp}, \quad (1)$$

откуда

$$F_m = \frac{Q_m}{k_m \cdot \Delta t_{cp}}, \quad (2)$$

где  $Q_m$  – количество теплоты, передаваемой теплоносителем, Вт;  $k_m$  – коэффициент теплопередачи от теплоносителя к бродильной массе, Вт/( $m^2 \cdot K$ );  $\Delta t_{cp}$  – средний температурный напор.

Для определения тепловой нагрузки необходимо составить тепловой баланс аппарата.

Уравнение теплового баланса в общем виде с учетом потерь теплоты в окружающую среду выражается равенством:

$$\sum Q_{np} = \sum Q_{pacx} + Q_{nom} \quad (3)$$

где  $Q_{np}$  – количество тепла, вносимого в аппарат, Вт;  $Q_{pacx}$  – количество тепла, уносимого из аппарата, Вт;  $Q_{nom}$  – количество тепла, теряемого в окружающую среду, Вт.

Составим уравнение теплового баланса для биореактора получения биогаза с барботажным перемешиванием биомассы (рис. 1).

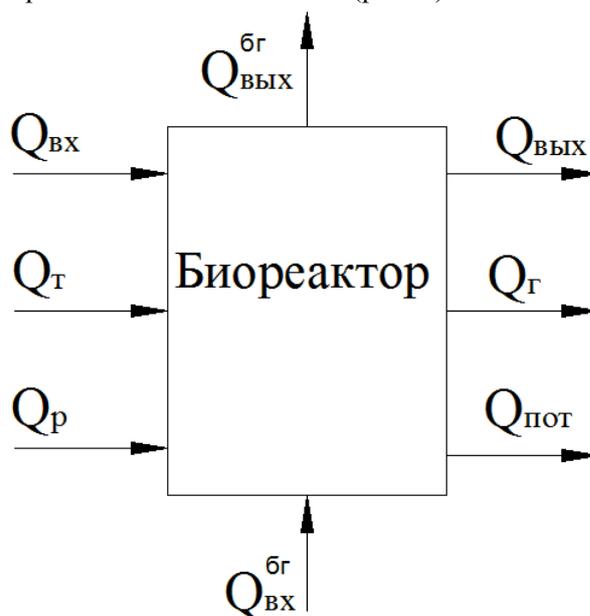


Рис. 1. Схема теплового баланса биореактора

Количество тепла, вносимого в биореактор, определяется выражением:

$$\sum Q_{np} = Q_{ex} + Q_{ex}^{\bar{\sigma}_2} + Q_p + Q_m \quad (4)$$

где  $Q_{ex}$  – количество тепла, поступающего с исходным субстратом, Вт;  $Q_{ex}^{\bar{\sigma}_2}$  – количество тепла, поступающего с барботажным биогазом, Вт;  $Q_p$  – количество тепла, выделяющегося в процессе экзотермической реакции анаэробной ферментации, Вт.

Количество тепла, поступающего с исходным субстратом, определяется:

$$Q_{ex} = c v_{ex} \rho T_{ex}, \quad (5)$$

где  $v_{ex}$  – объем исходной биомассы, м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность биомассы, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – теплоёмкость биомассы, Дж/кгК;  $T_{ex}$  – температура исходной биомассы, К.

Количество тепла, поступающего с барботажным биогазом, зависит от объема и температуры биогаза, подаваемого на перемешивание и определяется выражением:

$$Q_{ex}^{\bar{\sigma}_2} = c_{\bar{\sigma}_2} V_{\bar{\sigma}_2} \rho_{\bar{\sigma}_2} T_{ex}^{\bar{\sigma}_2} \quad (6)$$

где  $c_{\bar{\sigma}_2}$  – теплоёмкость барботажного биогаза, Дж/кгК;  $V_{\bar{\sigma}_2}$  – объем биогаза, подаваемого на барботажное перемешивание м<sup>3</sup>;  $\rho_{\bar{\sigma}_2}$  – плотность барботажного биогаза, кг/м<sup>3</sup>;  $T_{ex}^{\bar{\sigma}_2}$  – температура барботажного биогаза, поступающего на перемешивание, К.

Температура барботажного биогаза выше температуры производимого биогаза и зависит от степени его сжатия в компрессоре [11,12].

Количество тепла, выделяющегося в процессе экзотермической реакции анаэробной ферментации, зависит от содержания абсолютно сухого вещества в общем объеме биомассы:

$$Q_p = \mathcal{E}_p \cdot M_{ACB} \quad (7)$$

где  $\mathcal{E}_p$  – тепловая энергия, выделяющаяся с 1 кг абсолютно сухого вещества биомассы,  $\mathcal{E}_p=1,5$  МДж [13];  $M_{ACB}$  – масса абсолютно сухого вещества, кг.

Количество тепла, уносимого из биореактора, определяется выражением:

$$Q_m = Q_{вых} + Q_2 + Q_{вых}^{\bar{\sigma}_2} + Q_{ном} - Q_{ex} - Q_{ex}^{\bar{\sigma}_2} - Q_p \quad (14)$$

Для определения конструктивных параметров теплообменного оборудования, выполненного в форме змеевика, рассмотрим конструкцию змеевика (рис. 2). Так как теплообменное оборудование представляет собой приваренный снаружи змеевик, то теплопередача осуществляется не от всей поверхности трубы змеевика, а от 1/8 части поверхности трубы.

Следовательно:

$$\sum Q_{расх} = Q_{вых} + Q_2 + Q_{вых}^{\bar{\sigma}_2} \quad (8)$$

где  $Q_{вых}$  – количество тепла, уходящего с переработанной биомассой, Вт;  $Q_2$  – количество тепла, уходящего с производимым биогазом, Вт;  $Q_{вых}^{\bar{\sigma}_2}$  – количество тепла, уходящего с барботажным биогазом, Вт.

Количество тепла, уходящего с переработанной биомассой, определяется:

$$Q_{вых} = c v_{вых} \rho T_{вых}, \quad (9)$$

где  $v_{вых}$  – объем биомассы, удаляемой из биореактора, м<sup>3</sup>;  $T_{вых}$  – температура переработанной биомассы, К.

Количество тепла, уходящего с производимым биогазом, определяется:

$$Q_2 = c_2 V_2 \rho_2 T_2 \quad (10)$$

где  $c_2$  – теплоёмкость биогаза, Дж/кгК;  $V_2$  – объем производимого биогаза, м<sup>3</sup>;  $\rho_2$  – плотность биогаза, кг/м<sup>3</sup>;  $T_2$  – температура производимого биогаза, К.

Количество тепла, уходящего с барботажным биогазом, определяется:

$$Q_{вых}^{\bar{\sigma}_2} = c_{\bar{\sigma}_2} V_{\bar{\sigma}_2} \rho_{\bar{\sigma}_2} T_{вых}^{\bar{\sigma}_2} \quad (11)$$

$T_{вых}^{\bar{\sigma}_2}$  – температура барботажного биогаза, выходящего из биореактора, К.

Количество тепла, теряемое в окружающую среду, зависит от температуры окружающего воздуха и определяется:

$$Q_{ном} = k_{oc} \cdot F_{n\bar{\sigma}} \cdot (T - T_{oc}) \quad (12)$$

где  $k_{oc}$  – коэффициент теплопередачи в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F_{n\bar{\sigma}}$  – площадь поверхности биореактора, м<sup>2</sup>;  $T$  – температура биомассы в биореакторе, К;  $T_{oc}$  – температура окружающей среды, К.

Учитывая то, что температура перебродившей биомассы, температура производимого биогаза и температура барботажного биогаза на выходе из биореактора имеют температуру биомассы в биореакторе, получим:

$$T_{вых} = T_2 = T_{вых}^{\bar{\sigma}_2} = T \quad (13)$$

Используя уравнения (4-13) определим тепловую нагрузку биореактора:

$$F_m = \frac{F_{mp}}{8}, \quad (15)$$

где  $F_{mp}$  – площадь поверхности трубопровода, м,  $F_{mp} = \pi \cdot L_{зм} \cdot D_{зм}$ ,  $D_{зм}$  – диаметр трубы змеевика, м;  $L_{зм}$  – длина трубы змеевика, м.

Зная тепловую нагрузку, определим объемный расход теплоносителя  $V_m$  (м<sup>3</sup>/сек) из выражения:

$$V_m = \frac{Q_m}{\rho_m \cdot c_m \cdot (T_{m.n.} - T_{m.k.})} \quad (16)$$

где  $\rho_m$  – плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;  $c_m$  – удельная теплоемкость горячего теплоносителя, Дж/(кг·К);  $T_{m.n.}$  – начальная температура теплоносителя, К;  $T_{m.k.}$  – конечная температура теплоносителя, К.

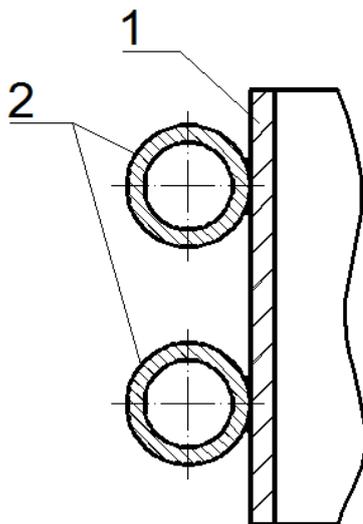


Рис. 2. Разрез змеевика.

Площадь поперечного сечения  $S_{зм}$  (м<sup>2</sup>) и диаметр змеевика  $D_{зм}$  (м) находим исходя из скорости теплоносителя, которая составляет  $\omega_m=1$  м/сек.

$$S_{зм} = \frac{V_m}{\omega_m}, \quad (17)$$

$$D_{зм} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{зм}}{\pi}}. \quad (18)$$

Далее определяем общую длину змеевика  $L_{зм}$ :

$$L_{зм} = \frac{F_{mp}}{\pi \cdot D_{зм}}, \quad (19)$$

и длину одного витка  $l_{в.зм}$ :

$$l_{в.зм} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot L_{зм}^2}{L_{зм}^2 - H_б^2}}, \quad (20)$$

Где  $D$  – диаметр биореактора, м;  $H_б$  – высота столба биомассы в биореакторе, м.

Зная рабочий объем биомассы можно определить высоту столба биомассы из выражения

$$H_б = 0,8 \cdot H \quad (21)$$

где  $H$  – высота биореактора, м.

Далее определяем шаг между витками  $h_б$ , т.е. расстояние между осями соседних витков, м:

$$h_б = \frac{H_б \cdot l_{в.зм}}{L_{зм}} \quad (22)$$

и количество витков змеевика  $n_{в.зм}$ :

$$n_{в.зм} = \frac{L_{зм}}{l_{в.зм}}. \quad (23)$$

**Выводы.** Полученные уравнения (3, 4, 8, 14) и другие вспомогательные выражения позволяют определить площадь поверхности теплообмена, тепловую нагрузку и конструктивные размеры теплообменного оборудования в форме змеевика, с учетом применения системы перемешивания барботажного типа.

\*Работа выполнена в рамках Гранта РФФИ № 14-48-08039.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Weiland, P., 2003. Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany. Appl. Biochem. Biotechnol. 109: 263–274.
2. Fischer, T., Backes, K., 2007. Biogas production from gut contents and low value offal. Ninth International Symposium on World Rendering. 97-103.
3. Суслов Д.Ю. Разработка системы газоснабжения сельскохозяйственного предприятия с использованием биогаза // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 4. С. 183-186.
4. Suslov D.Yu., Kushchev L.A. Biogas technology – a contemporary method for processing organic wastes // Chemical and Petroleum Engineering. 2010. Т. 46. № 5. С. 308-311.
5. Евстюничев М.А., Ильина Т.Н. Особенности сырьевой базы Белгородской области для производства биогаза // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 5. С. 170-173.
6. Суслов Д.Ю. Экспериментальные исследования процесса получения биогаза в барботажных биореакторах Концепт. 2013. Т. 4. 34. С. 1471-1475.
7. Биогаз на основе возобновляемого сырья. Сравнительный анализ шестидесяти одной установки по производству биогаза в Германии / Специальное агентство возобновляемых ресурсов (FNR) Хофплатц 1, 18276, Гюльцов, Германия. – 2010. – 115 с.
8. Альперт, Л.З. Основы проектирования химических установок: учебное пособие. - М.: Высш.шк., 1989. – 304 с.

9. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева - М.: Энергия, 1977. – 344 с.

10. Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: Учеб. пособие для энергет. спец. вузов. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 1980. – 472 с.

11. Пластинин, П.И. Поршневые компрессоры. Том 1. Теория и расчет. – 3-е изд., доп. – М.: КолоС, 2006. – 456 с.: ил.

12. Поршневые компрессоры: Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Холодильные и компрессорные машины и установки» / Б.С. Фотин, И.Б. Пирумов, И.К. Прилуцкий, П.И. Пластинин; Под общ. ред. Б.С. Фотина. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 372 с.: ил.

13. Твайделл, Дж., Уэйр, А. Возобновляемые источники энергии: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат. 1990. – 392 с.: ил.