УДК 631.017.3: 621.181

DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-93-99

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛО– МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
В ГАЗОИСПОЛЗУЮЩЕМ КОРМОВАРОЧНОМ КОТЛЕ
С САМОРЕГУЛИРОВАНИЕМ МОЩНОСТИ**

¹Шувалов Анатолий Михайлович

¹Машков Алексей Николаевич

¹Чернов Денис Серафимович

¹ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. В настоящее время фермерские и личные подсобные хозяйства (ЛПХ) производят значительную долю мяса – молочной и овощной продукции. При содержании скота и птицы наибольшие энергозатраты возникают при приготовлении для них кормов. Основным способом обработки кормов в ЛПХ и фермерских хозяйствах является энергозатратная тепловая обработка. Существует широкий спектр кормоварочных котлов различных по производительности, конструктивному исполнению, используемых энергоносителей, средств автоматического управления тепловыми процессами. Самым дешевым энергоносителем в тепловых процессах для приготовления кормов является природный газ. В настоящее время серийно выпускаются газоиспользующие варочные котлы для приготовления кормов и пищи. Общим недостатком их является отсутствие автоматики регулирования расхода газа пропорционально потребляемому тепловому потоку, что приводит к значительному перерасходу природного газа. Следует отметить, что в России на выращивание и переработку сельхозпродукции тратится энергии в 2 – 2,5 раза больше чем в странах Западной Европы. По этой причине в начале 2010 года вступил в силу федеральный закон №261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности...». В результате информационно – патентных исследований установлено, что совершенствованием средств автоматики системы энергообеспечения варочных котлов можно достигнуть значительной экономии газа. Для совершенствования средств автоматики, обоснования эффективных режимов работы системы энергообеспечения варочного котла разработана математическая модель, описывающая его теплоэнергетические процессы. Разработано дифференциальное уравнение теплового баланса, позволяющее исследовать процессы в динамических режимах. Приведены формулы для определения полезной теплоты, потерь теплоты на нагрев металлоконструкций котла, с уходящими газами, от химического недожога, от кожуха котла в окружающую среду. Разработанная математическая модель позволяет исследовать режимы работы котла и обосновать параметры эффективной системы его энергообеспечения.

Ключевые слова: газ, кормоварочный котел, саморегулирование, мощность, математическая модель.

**MATHEMATICAL MODEL OF HEAT AND MASS EXCHANGE PROCESSES IN A GAS-
USED FEEDING AND COOKING BOILER WITH POWER SELF-REGULATION**

¹Shuvalov Anatoliy

¹Mashkov Alexey

¹Chernov Denis

¹FSBSI “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”

Annotation. Currently, farms and personal subsidiary plots produce a significant share of meat - dairy and vegetable products. When keeping livestock and poultry, the greatest energy consumption occurs during the preparation of feed for them. The main method of processing feed in private household plots and on farms is energy-consuming heat treatment. There is a wide range of feed boiler boilers of various capacities, designs, energy carriers used, and automatic control of thermal processes. The cheapest energy carrier in thermal processes for preparing feed is natural gas. In our country and

abroad, gas-powered cooking boilers for the preparation of feed and food are serially produced. Their common drawback is the lack of automatic control of gas flow in proportion to the consumed heat flow, which leads to a significant overrun of natural gas. It should be noted that in Russia fuel consumption is 2–2.5 times more than in Western Europe for the production of a unit of gross domestic product. It is no coincidence that at the beginning of 2010 federal law No. 261 “On energy conservation and improving energy efficiency ...” entered into force. As a result of information and patent research, it has been established that by improving the automation equipment of the energy supply system of digesters, significant gas savings can be achieved. To improve automation, justify the effective modes of operation of the energy supply system of the digester, a mathematical model has been developed that describes its heat and energy processes. A differential heat balance equation has been developed that allows one to study processes in dynamic modes. Formulas are given for determining useful heat, heat loss due to heating of metal constructions of the boiler, with flue gases, from chemical underburning, from the boiler casing to the environment. The developed mathematical model allows us to study the modes of operation of the boiler and justify the parameters of an effective system of its energy supply.

Keywords: gas, feed boiler, self-regulation, power, mathematical model.

Введение. За прошедшее 30 – летие в сельском хозяйстве были созданы и успешно функционируют фермерские хозяйства. В настоящее время более 70 % мяса, молока, овощей и фруктов производят фермерские и личные подсобные хозяйства (ЛПХ). Производство животноводческой продукции и овощей связано с значительным расходом энергии на приготовление кормов, содержание скота, выращивание овощей в теплицах. Проведённый нами мониторинг по использованию энергетических ресурсов в сельхозпредприятиях различной формы собственности показал (1), что удельная доля затрат на электроэнергию в себестоимости продукции сельхозпредприятия животноводческого направления составляет в растениеводстве – 3,74 %, в животноводстве при производстве: молока 22,32 %, свинины – 11 %, говядины – 8,27 %. Эти цифры подтверждают, что самым энергоёмким производством является животноводство.

График потребления энергии суммарно (рисунок 1), в четырёх районах Тамбовской области (Тамбовский, Рассказовский, Сямпурский, Знаменский) по месяцам года показывает, что в зимний период (декабрь, январь, февраль) расход энергии в 4 раза больше, чем летом (июнь, июль). Это подтверждает то, что в зимний период наибольший расход энергии идёт на тепловые цели, то есть заложен огромный потенциал в экономии дорогостоящей электроэнергии за счет самого дешевого энергоносителя - природного газа.

Наиболее эффективно использовать природный газ в тепловых процессах на приготовление кормов кормозапарниками, варочными котлами и другим кормоприготовительным оборудованием, а так же на приготовление пищи и горячей воды.

Рисунок 1 - Потребление электроэнергии в четырёх районах Тамбовской области по месяцам года.

Общеизвестно, что в России и в других странах выпускается широкий спектр газоиспользующих варочных котлов для приготовления пищи, горячей воды и кормов. Общим недостатком их является отсутствие автоматики регулирования расхода газа пропорционально потребляемому тепловому потоку, что приводит к изменению расхода газа. Следует отметить, что в нашей стране на выращивание и переработку сельскохозяйственной продукции тратится энергии в 2-2,5 раза больше, чем в странах Западной Европы. Не случайно в конце 2009г. был опубликован Федеральный закон №261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности».

Информационно-патентные исследования показывают, что существующая газовая автоматика применяется в основном для обеспечения безопасности процесса сжигания газозелозудной смеси в газогорелочном устройстве и для обеспечения нормальной работы котла. С точки зрения энергообеспечения варочного котла особенностью его является постепенное снижение потребляемого теплового потока пропорционально повышению температуры нагреваемого продукта в варочной емкости. В существующих варочных котлах предусмотрены средства автоматизации с ступенчатым режимом регулирования мощности («включено-выключено»). Однако при повышении температуры содержимого варочной емкости близко к закипанию продукта, при ступенчатом регулировании значительно увеличивается частота включения и отключения газогорелочного устройства. Такой режим работы газовой горелки снижает надежность работы, происходит повышенный износ средств автоматизации и устройств горелки, а также при частом включении возможен срыв пламени или неправильный розжиг, что может привести к тяжелым последствиям. И конечно, отсутствие плавного регулирования мощности горелки пропорционально потребляемому тепловому потоку сопровождается перерасходом газа. Кроме того для поддержания «тихого» кипения оператор должен дополнительно настраивать ручную топочное устройство, что увеличивает трудозатраты обслуживающего персонала. В этой связи является актуальным проведение научно-исследовательских работ по обоснованию и применению перспективных средств автоматизации газоиспользующей системы энергообеспечения кормоварочного котла с пропорциональным регулированием теплового потока [2].

Цель исследования – Разработать математическую модель, описывающая процессы тепло – массообмена в кормоварочном котле с саморегулированием мощности.

Материалы и методы. Для разработки математической модели применили методы системного анализа и синтеза существующих знаний в области проводимых исследований.

Результаты и их обсуждение. Чтобы теоретически исследовать режимы работы системы энергообеспечения газоиспользующего варочного котла и определить энергетические параметры необходимо разработать математическую модель, описывающая процессы тепло-массообмена.

Весь процесс энергообеспечения кормоварочного котла при нагреве продукта до кипения в варочной ёмкости и последующей его термической обработки описывается математическим выражением

$$dQ_{\text{кк}(1-2)} = dQ_1 + dQ_2 + dQ_3' + dQ_4' + dQ_4'' + dQ_5 + dQ_6 + dQ_7,$$

где $dQ_{\text{кк}(1-2)}$ - энергия газогорелочного устройства, Дж.

Расход энергии на доведение воды до кипения в пароводяном сосуде:

$$dQ_1 = C_{\text{в}} \cdot dt_{\text{в}} \cdot d t_{\text{в}},$$

где $C_{\text{в}}$ – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°C).

Теплопотери на разогрев металлоконструкций пароводяного сосуда:

$$dQ_2 = \sum_{i=1}^n C_{\text{зи}} \cdot m_{\text{зи}} \cdot dt_{\text{зи}},$$

где $C_{\text{зи}}$ – удельная теплоемкость металла, Дж/(кг·°C); $m_{\text{зи}}$ – масса пароводяного сосуда, кг.

Потери теплоты от кожуха котла в окружающую среду определим

$$dQ_3' = \sum_{i=1}^n \alpha_{\text{зи}} \cdot F_{\text{зи}} \cdot (t_{\text{ср}} - t_0) d\tau,$$

где $\alpha_{\text{зи}}$ – коэффициент теплоотдачи от кожуха окружающему воздуху, Вт/(м²·°C); $F_{\text{зи}}$ – теплоотдающая поверхность кожуха, м²; t_0 и $t_{\text{ср}}$ – начальная и конечная температура кожуха, °C.

1 – воздушная камера; 2 – топочное устройство; 3 – газовая горелка; 4 – патрубок для отвода газов; 5 – переходной патрубок; 6 – корпус котла; 7 – продувочный вентиль; 8 – варочная емкость; 9 – сильфон; 10 – система рычагов; 11 – газовый клапан; 12 – воздушная заслонка

Рисунок 2 – Схема к расчету тепло- массообменных процессов кормоварочного котла на газовом топливе

Передача тепла от кипящей воды в паровую рубашку:

$$dQ_4' = \alpha_{\text{зерк}} \cdot F_{\text{зерк}} \cdot (t_{\text{вср}} - t_{\text{оруб}}) d\tau,$$

где $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи от воды пароводяного сосуда, Вт/(м²·°C); $F_{\text{зерк}}$ – поверхность воды в пароводяном сосуда, м²; $t_{\text{вср}} = (t_{\text{вн}} + t_{\text{вк}})/2$ – средняя температура воды в пароводяном сосуда, °C, где $t_{\text{вн}}$ – начальная температура воды в водяной камере, °C; $t_{\text{вк}}$ – конечная температура воды в водяной камере, °C; $t_{\text{оруб}}$ – температура воздуха в паровой рубашке, °C.

Теплопотери в процессе продувки паровой рубашки:

$$dQ_4'' = V_{\text{во}} \cdot \rho_{\text{во}} \cdot C_{\text{во}} \cdot dt_{\text{во}},$$

где $V_{\text{во}}$ – объем, м³; $\rho_{\text{во}}$ – плотность, кг/м³; $C_{\text{во}}$ – удельная теплоемкость продувочного воздуха, Дж/(кг·°C).

Теплота для нагрева металлических частей паровой рубашки:

$$dQ_5 = \sum_{i=1}^n C_{1i} \cdot m_{1i} \cdot dt_{1ik},$$

где C_{1i} – удельная теплоемкость металла, Дж/(кг·°C); m_{1i} – масса металлических частей, кг.

Потери тепла с уходящими газами определяют по формуле[3]:

$$Q_6 = I_{\text{yx}} - I_{\text{x.вз}}$$

$$dQ_6 = [V_{\text{г}} \cdot \rho_{\text{г}} \cdot C_{\text{рг}} (T_{\text{yx}} - 273) - \alpha_{\text{yx}} \cdot V_{\text{вз}} \cdot \rho_{\text{вз}} \cdot C_{\text{рв}} (T_{\text{x.вз}} - 273)] d\tau,$$

где V_{Γ} – объем сгоревшего газа, м^3 ; ρ_{Γ} – плотность отработанных газов, $\text{кг}/\text{м}^3$; $C_{\text{рг}}$ – теплоемкость отработанных газов, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}\cdot\text{К}$; T_{yx} – температура отработанных газов, К ; α_{yx} – коэффициент избытка воздуха; $V_{\text{вз}}$ – объем воздуха, поступающего в топку, м^3 ; $\rho_{\text{вз}}$ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; $C_{\text{рв}}$ – средняя теплоемкость воздуха, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}\cdot\text{К}$; $T_{\text{х.вз}}$ – температура воздуха поступающего в топку, К .

Воздух, поступающий в топку котла, частично не успевает вступить в процесс горения. Поэтому для обеспечения полного сгорания топлива необходимо подвести к нему несколько большее количество воздуха, чем это требуется теоретически [4], которое учитывается коэффициентом избытка воздуха:

$$\alpha = \frac{V_{\text{д}}}{V_{\text{о}}},$$

Расход газа на нагрев корма до кипения:

$$V_{\Gamma} = \frac{c_{\text{в}} \cdot M_{\text{в}} \cdot (T_{\text{кип}} - T_{\text{нач}})}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot \eta}, \text{ м}^3$$

Чтобы поддерживать оптимальное соотношение горючей смеси необходимо регулировать подачу воздуха и газа:

$$dV_{\text{в}} = \frac{V_{\text{в}}^{\text{д}} \cdot dV_{\Gamma}}{V_{\text{в}}^0}, \text{ м}^3$$

В процессе горения газа в топке выделится теплота:

$$dQ = dQ_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot dV_{\Gamma}$$

Выделившаяся теплота нагревает воду в пароводяном сосуде до кипения. В результате образуется пар:

$$dm_{\text{н}} = \frac{dQ - \sum Q_{\text{ном}}}{r},$$

где r – теплота парообразования, $\text{Дж}/\text{кг}$; $Q_{\text{пот}}$ – суммарные теплотопотери кормоварочного котла, Дж .

Сконденсировавшийся пар в паровой рубашке определится:

$$dm_{\text{с}} = (k \cdot F_{\text{вс}} (T_{\text{п}} - T_{\text{в}}) + \sum Q_{\text{пот}}) \frac{d\tau}{r}, \text{ кг}$$

где k – коэффициент теплопередачи, который определяется по формуле:

$$k = \frac{1}{\left(\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{пс}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{сс}}} \right)}$$

где δ – толщина стенки; λ – теплопроводность материала из которого она изготовлена, $\alpha_{\text{пс}}$ – коэффициент теплоотдачи от пара в парогенераторе стенке варочной емкости; $\alpha_{\text{сс}}$ – коэффициент теплоотдачи от стенки к содержимому варочной емкости.

Температура, до которой нагреется содержимое в варочной емкости, определится из выражения:

$$dT_{\text{в}} = \frac{k \cdot F_{\text{вс}} (T_{\text{п}} - T_{\text{в}})}{c_{\text{в}} \cdot m_{\text{в}}} d\tau, \text{ К}$$

где $F_{\text{вс}}$ – площадь поверхности стенок варочной емкости.

Если масса пара вырабатываемая топочным устройством с пароводяной рубашкой превысит величину сконденсировавшегося пара, то образуется избыток пара.

Масса несконденсированного пара изменяется следующим образом:

$$dm_{\text{н}} = dm_{\text{п}} - dm_{\text{с}}, \text{ кг.}$$

Давление пара в парогенераторе определяется [5]:

$$P_{\pi} = n \cdot k_B \cdot T_{\pi}, \text{ Па}$$

где k_B – постоянная Больцмана, n – концентрация молекул воды в паровом пространстве, м^{-3} .

Избыточное давление пара с помощью сильфона передаётся на воздушную заслонку и блок-кран газогорелочного устройства, управляющий подачей газа. Все это приводит к уменьшению количества поступающей топливозвоздушной смеси и снижению тепловой производительности топки.

Обобщая выше изложенное и представляя уравнение в канонической форме получаем математическую модель, описывающую энергетические и тепло-массообменные процессы кормоварочного котла с саморегулированием мощности.

$$\begin{aligned} V_{\Gamma} &= \frac{c_B \cdot M_B \cdot (T_{\text{кип}} - T_{\text{нач}})}{Q_H^p \cdot \eta} \\ dV_{\Gamma} &= G_{\Gamma} \cdot d\tau \\ dV_B &= \frac{\alpha \cdot V_{\Gamma}^0 \cdot dV_{\Gamma}}{V_{\Gamma}} \\ dQ &= dQ_H^p \cdot dV_{\Gamma} \\ dm_{\pi} &= \frac{dQ - \sum Q_{\text{пот}}}{r} \\ dm_c &= (k \cdot F_{\text{ве}} (T_{\pi} - T_B) + \sum Q_{\text{пот}}) \frac{d\tau}{r} \\ dT_B &= \frac{(k \cdot F_{\text{ве}} (T_{\pi} - T_B))}{c_B \cdot m_B} d\tau \\ dm_H &= dm_{\pi} - dm_c \\ dQ_j &= (\sum Q_{\text{пот}} + k \cdot F_{\text{ве}} \cdot (T_{\pi} - T_B)) d\tau \end{aligned}$$

Выводы: разработанная математическая модель теплоэнергетических процессов газоиспользующего кормоварочного котла с саморегулированием мощности позволяет установить закономерности изменения энергетических и режимных параметров.

Список литературы

1. Шувалов А.М., Калинин В.Ф., Набатов К.А. Мониторинг энергопотребления сельхозпредприятий Тамбовской области // Труды 6-й Международной конференции. Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. – М., ГНУ ВИЭСХ. – 2008. – С.260 - 265.
2. Пат. №2708097 РФ МПК А47J 27/06. Котёл кормоварочный. / Шувалов А.М., Машков А.Н., Чернов Д.С.; заявитель и патентообладатель ФГБНУ ВНИИТиН. - №201420554/13, №2019116589, заяв. 29.05.2019; опубл. 04.12.2019. Бюл. №34.
3. Панин В.И. Котельные установки малой и средней мощности. – М.:Стройиздат, 1975. – 384с.
4. Хазмалян Д.М. Теория топочных процессов.- М.: Энергоатомиздат, 1990.- 352с.
5. Щукин А.А., Сушкин И.Н. Теплотехника. –М.: Металлургия, 1973.- 482с

References

1. SHuvalov A.M., Kalinin V.F., Nabatov K.A. Monitoring energopotrebieniia sel'hozpredpriyatij Tambovskoj oblasti // Trudy 6-j Mezhdunarodnoj konferencii. Energoobespechenie i energosberezhenie v sel'skom hozyajstve. – М., GNU VIESKH. – 2008. – S.260 -265.
2. Pat. №2708097 RF MPK A47J 27/06. Kotyol kormovarochnyj. / SHuvalov A.M., Mashkov A.N., CHernov D.S.; zayavitel' i patentoobladatel' FGBNU VNIITiN. - №201420554/13, №2019116589, zayav. 29.05.2019; opubl. 04.12.2019. Byul. №34.
3. Panin V.I. Kotel'nye ustanovki maloj i srednej moshchnosti. – М.:Strojizdat, 1975. – 384s.
4. Hazmalyan D.M. Teoriya topochnyh processov.- М.: Energoatomizdat, 1990.- 352s.
5. SHCHukin A.A., Sushkin I.N. Teploekhnika. –М.: Metallurgiya, 1973.- 482s

Сведения об авторах**Принадлежность к организации**

Шувалов Анатолий Михайлович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: vniiti@mail.ru.

Машков Алексей Николаевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: vniiti@mail.ru.

Чернов Денис Серафимович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: vniiti@mail.ru.

Author credentials**Affiliations**

Shuvalov Anatoliy – Full Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: vniiti@mail.ru.

Mashkov Alexey – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: vniiti@mail.ru.

Chernov Denis – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: vniiti@mail.ru.

Поступила в редакцию (Received): 14.02.2020 Принята к публикации (Accepted): 20.03.2020

УДК 621.899

DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-99-104

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА И ХАРАКТЕРИСТИК
МОТОРНОГО МАСЛА НА ИЗМЕНЕНИЕ ЕГО СВОЙСТВ В ДВС И СРОК СЛУЖБЫ**

¹Остриков Валерий Васильевич

¹Нагдаев Владимир Константинович

¹Забродская Алла Владимировна

¹Кошелев Александр Викторович

¹ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. В процессе работы двигателей тракторов в моторных маслах в зависимости от свойств используемого дизельного топлива и качества масла происходит накопление загрязнений, способствующих снижению эксплуатационных характеристик двигателя и срока службы масла до замены. Установлено, что изменение свойств масла также связано с техническим состоянием двигателя и сроком его эксплуатации. Получены зависимости изменения содержания загрязненности и щелочного числа моторного масла в двигателе Д-245 первого года эксплуатации и после 5 лет работы при условии высокого качества используемого дизельного топлива и смазочного масла. Определено, что за период наработки 250 часов содержание загрязнений в масле нового двигателя имело значение на 20 % ниже, чем после 5 лет эксплуатации. Аналогично изменялось щелочное число масла, свидетельствующее об остаточном содержании присадок в масле. В результате исследований по оценке влияния качества дизельного топлива на изменение загрязненности масла установлено, что топливо, имеющее отклонения от требований стандартов, снижает срок службы масла до замены более чем на 20 %. При использовании в двигателях тракторов моторных масел, имеющих отклонения от нормативных значений, установлен рост загрязнений уже в первые 50 часов работы двигателей и первого года эксплуатации и после 5 лет работы. При этом уже к 150 часам наработки содержание