

УДК 628.16:621.981.3

Тришевский О. И.

Салтавец Н. В.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ВАЛОК-ПОЛОСА И ЕЁ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ СТАНОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Стоящая на протяжении XX столетия задача наращивания объёмов выпуска прокатной продукции потребовала от металлургов неоднократного изменения и усовершенствования применяющихся технологий горячей прокатки листа. В соответствии с этими задачами увеличивались и совершенствовались и системы водоснабжения прокатных станков. Экономический кризис 90-х годов прошлого века обусловил появление технологий, обеспечивающих существенное сокращение затрат на производство продукции.

Анализ отечественной и зарубежной технической литературы [1–4] показал, что на сегодняшний день вследствие отсутствия единого мнения по поводу тепловых процессов, имеющих место на прокатных станах, конструктивное выполнение систем подачи воды для охлаждения валков и полосы отличается значительным разнообразием, недостаточной обоснованностью использования отдельных схем и требует дальнейшего усовершенствования.

Для оценки возможности реконструкции и совершенствования систем водоснабжения по критерию энергетических затрат необходимо иметь научно обоснованную методику расчёта количества воды, которое будет использоваться при той или иной новой технологии. Традиционно количество воды для систем водоснабжения прокатных станков определяли на основе натурных экспериментов на существующем оборудовании. Это длительный процесс, требующий больших затрат, при котором возможны аварии и остановки производства вследствие поломок оборудования при проведении экспериментальных работ.

В связи с этим одним из существенных аспектов решения этой проблемы является необходимость расчётов потребного количества воды для водоснабжения станков ещё на этапе их проектирования или реконструкции. Подобные расчёты могут быть произведены только на основе апробированных математических моделей тепловых процессов, происходящих в системе прокатываемая полоса – валок.

Целью настоящих исследований теплового баланса системы прокатываемая полоса – валок является разработка методики проектирования систем водоснабжения прокатных станков с управлением процессом по критерию экономии энергии.

Поставленная задача может быть решена путём математического моделирования теплового состояния металла [5] и валков. Из приведенной в работе [5] математической модели теплового состояния системы полоса-окалина-валок, охватывающей все участки горячей прокатки листа, где происходят активные процессы теплообмена:

– для полосы при $0 + \delta < x < H - \delta$; $0 + \delta < y < B - \delta$; $0 + \delta < z < L - \delta$ и $\tau > 0$:

$$c_m p_m \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) \left(+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) + p_m u_m \frac{\partial}{\partial x} (c_m T_m) + q_v; \quad (1)$$

– для окалина при $H - \delta < x < 0 + \delta$; $B - \delta < y < 0 + \delta$; $L - \delta < z < 0 + \delta$ и $\tau > 0$:

$$c_0 p_0 \frac{\partial T_0}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial x} \right) \left(+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial z} \right) + p_0 u_0 \frac{\partial}{\partial x} (c_0 T_0); \quad (2)$$

– для валка $H < x < 0$; $B < y < 0$; $L < z < 0$ и $\tau < 0$:

$$c_r p_r \frac{\partial T_r}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial x} \right) \left(+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial z} \right); \quad (3)$$

наибольший интерес представляет участок деформации полосы в валках (рис. 1) и участок принудительного охлаждения со следующими начальными и граничными условиями:

$$\begin{array}{l} \text{начальные условия:} \\ \text{при } \tau = 0 \end{array} \left\{ \begin{array}{l} T_m = f(x_m, y_m, z_m); \\ T_0 = f(x_0, y_0, z_0); \\ T_r = f(x_r, y_r, z_r); \end{array} \right. \quad (4)$$

граничные условия на участке деформации на границе окалина-валок:

$$\begin{array}{l} \text{при } x = 0 \\ \text{при } x = H \\ \text{при } y = 0 \\ \text{при } y = B \\ \text{при } z = 0 \\ \text{при } z = L \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial x} = \lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial x}; \quad T_0(\tau) = T_r(\tau); \\ \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial x} = \lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial x}; \quad T_0(\tau) = T_r(\tau); \\ \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial y} = \lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial y}; \quad T_0(\tau) = T_r(\tau); \\ \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial y} = \lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial y}; \quad T_0(\tau) = T_r(\tau); \\ \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial z} - \alpha_\alpha (T_\alpha - T_0) = 0; \\ \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial z} - \alpha_\alpha (T_\alpha - T_0) = 0; \end{array} \right. \quad (5)$$

граничные условия на участке деформации на границе окалина-полоса:

$$\begin{array}{l} \text{при } x = \delta \\ \text{при } x = H - \delta \\ \text{при } y = \delta \\ \text{при } y = B - \delta \\ \text{при } z = \delta \\ \text{при } y = L - \delta \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial x} = \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x}; \quad T_0(\tau) = T_m(\tau); \\ \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial x} = \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x}; \quad T_0(\tau) = T_m(\tau); \\ \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial y} = \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial y}; \quad T_0(\tau) = T_m(\tau); \\ \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial y} = \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial y}; \quad T_0(\tau) = T_m(\tau); \\ \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial z} = \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial z}; \quad T_0(\tau) = T_m(\tau); \\ \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial z} = \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial z}; \quad T_0(\tau) = T_m(\tau); \end{array} \right. \quad (6)$$

граничные условия на участке принудительного охлаждения:

$$\begin{array}{l} \text{при } x = 0 \\ \text{при } x = H \\ \text{при } y = 0 \\ \text{при } y = B \\ \text{при } z = 0 \\ \text{при } z = L \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial x} - \alpha_p (T_w - T_0) = 0; \\ \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial x} - \alpha_p (T_w - T_0) = 0; \\ \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial y} - \alpha_p (T_w - T_0) = 0; \\ \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial y} - \alpha_p (T_w - T_0) = 0; \\ \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial z} - \alpha_p (T_w - T_0) = 0; \\ \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial z} - \alpha_p (T_w - T_0) = 0; \end{array} \right. \quad (7)$$

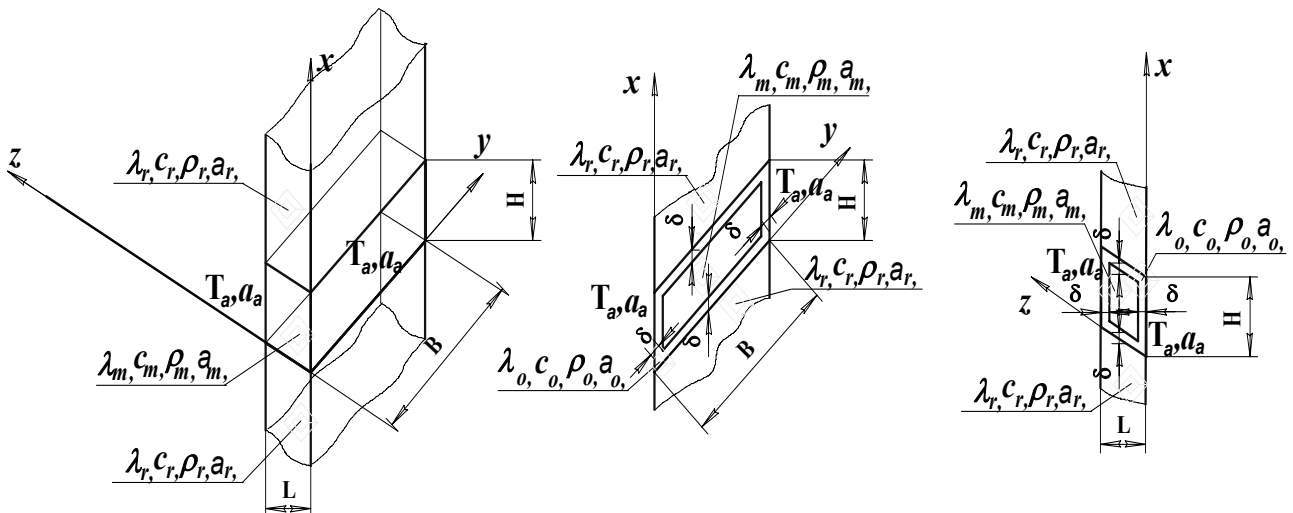


Рис. 1. Схема распределения теплофизических характеристик пластины на участке деформации (тепловыделение от пластической деформации – q_v равномерное по сечению пластины)

В уравнениях 1–7: T_m , T_o , T_r – температура полосы, окалины и валка соответственно; $u_m = u_o + u_d$ – скорость перемещения полосы; u_o – скорость окисления; u_d – скорость деформирования; α_f – коэффициент теплопередачи в нагревательной печи; α_w – коэффициент теплоотдачи на участке гидросмыва окалины; $\alpha_a = \alpha_{conv} + \alpha_{air}$; α_{conv} – коэффициент теплоотдачи за счёт конвекции; α_{air} – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду; α_p – коэффициент теплоотдачи в установках ускоренного охлаждения; T_f – температура печи; T_w – температура воды; T_a – температура окружающей среды; q_v – тепловыделение от пластической деформации полосы.

Известно [6], что стойкость валка в значительной мере зависит от твердости его поверхности. Чем больше твердость поверхности валка, тем выше его стойкость. Твердость может быть обеспечена использованием заэвтектоидной стали с содержанием углерода 1,6–1,8 %. При нагрузках, которые имеют место на листовых станах, использование сплошного валка из заэвтектоидной стали проблематично, потому что существует риск его поломки. Поэтому при теоретических исследованиях рассмотрена схема современного двухслойного валка (рис. 2).

Процесс теплопередачи в цилиндре описывается системой уравнений. Дифференциальные уравнения с соответствующими начальными и граничными условиями для слоев валка:

– внутренний слой:

при $0 < r < r_2$; $0 < \varphi < 2\pi$; $0 < y < L$ и $\tau > 0$:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \right); \quad (8)$$

– бандаж:

при $r_2 < r < R$; $0 < \varphi < 2\pi$; $L_1 < y < L - L_5$ и $\tau > 0$:

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \right); \quad (9)$$

начальные условия:

$$\text{при } \tau = 0 \quad T_1 = T_2 = T_H = \text{const}; \quad (10)$$

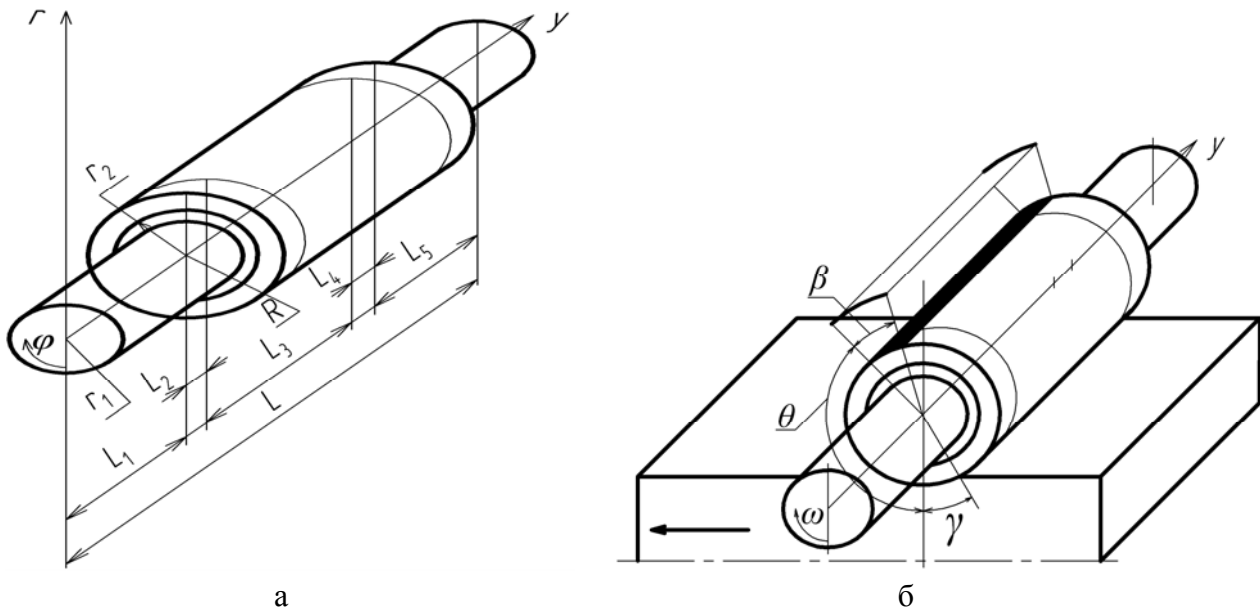


Рис. 2. Схема листопркатного вала:

(а) r, y оси координат; r_1 – радиус опорных шеек; r_2 – внутренний радиус бандажа; R – внешний радиус вала; L – длина вала; L_1 – длина левой шейки вала; $L_2 + L_3 + L_4$ – длина рабочей части вала; L_2, L_4 – длина частей бочки вала, не контактирующих с металлом; L_3 – ширина прокатываемой полосы; L_5 – длина правой шейки вала; (б) γ – угол; θ – угол от выхода полосы из зоны деформации зоны принудительного охлаждения; β – угол зоны принудительного охлаждения; \leftarrow направление прокатки

граничные условия:

$$\text{при } y = 0 \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} - \alpha_{w2} (T_{w2} - T_1) = 0; \quad (11)$$

$$\text{при } r = r_1 \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} - \alpha_{w2} (T_{w2} - T_1) = 0; \quad (12)$$

$$\text{при } y = L_1; r_1 < r < r_2 \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} - \alpha_{w2} (T_{w2} - T_1) = 0; \quad (13)$$

$$\text{при } r = r_2 \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}; \quad T_1(\tau) = T_2(\tau); \quad (14)$$

$$\text{при } y = L_1; r_2 < r < R \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} - \alpha_a (T_a - T_2) = 0; \quad (15)$$

$$\text{при } L_1 < y < L_1 + L_2; r = R \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} - \alpha_a (T_a - T_2) = 0; \quad (16)$$

$$\text{при } L_1 + L_2 + L_3 < y < L - L_5; r = R \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} - \alpha_a (T_a - T_2) = 0; \quad (17)$$

$$\text{при } y = L - L_5; r_2 < r < R \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} - \alpha_a (T_a - T_2) = 0; \quad (18)$$

$$\text{при } y = L - L_5; r_1 < r < r_2 \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} - \alpha_a (T_a - T_1) = 0; \quad (19)$$

$$\text{при } y = L \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} - \alpha_{w2} (T_{w2} - T_1) = 0; \quad (20)$$

при $L_1 + L_2 < y < L_1 + L_2 + L_3; r = R$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = A(\varphi), \quad (21)$$

где функция:

$$A(\varphi) = A(\varphi) - a_y (T_m - T_1) \text{ при } 0 \leq \varphi \leq \gamma;$$

$$A(\varphi) = 0 \text{ при } \gamma \leq \varphi \leq (\gamma + \theta);$$

$$A(\varphi) = A(\varphi) - a_{w3} (T_1 - T_w) \text{ при } (\gamma + \theta) \leq \varphi \leq (\gamma + \theta + \beta);$$

$$A(\varphi) = 0 \text{ при } (\gamma + \theta + \beta) \leq \varphi \leq 2\pi.$$

В уравнениях (8–21):

T_1, T_2 – температура внутреннего и внешнего слоёв валка, соответственно;

T_{w2} – температура охлаждающей среды в подшипнике;

T_m – температура полосы;

T_w, T_a – температура воды и окружающей среды соответственно;

α_{w2} – коэффициент теплоотдачи в подшипнике;

α_{w3} – коэффициент теплоотдачи на участке принудительного охлаждения;

$$\alpha_a = \alpha_{conv} + \alpha_{air};$$

α_{conv} – коэффициент теплоотдачи конвекцией;

α_{air} – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду;

α_y – коэффициент теплопередачи от полосы к валку.

Теплообменом с окружающей средой поверхностей, не контактирующих с прокатываемым металлом и охладителем, пренебрегаем.

Созданные математические модели должны базироваться на надёжных данных о граничных условиях теплообмена в зонах нагрева и охлаждения [6].

Данные по значениям коэффициентов теплоотдачи для различных устройств подачи воды можно получить в лабораторных условиях. Естественно, результаты замеров на лабораторных установках должны быть математически обработаны – необходимо выполнить решение обратной задачи теплопроводности [7].

Поскольку известно, что ошибка выполнения теплотехнических измерений существенно зависит от методики их проведения, немалое значение имеет правильно выбранная методика и аппаратная база проведения этих исследований. Доказано [8], что в случае применения фольговых термодатчиков толщиной 10 мкм ошибка измерительного комплекса (термодатчик – прибор) значительно меньше ошибки, с которой в справочной литературе приведены значения теплофизических характеристик полосы. Апробированная в работе [8] система регистрации температуры позволила выполнить комплекс исследований, позволяющих уточнить скорость изменения температуры поверхности испытываемых образцов под воздействием интенсивного охлаждения водой.

Имея математические модели с надёжными данными про условия теплообмена, возможно рассчитать тепловое состояние объектов с распределёнными параметрами на всех участках технологического процесса, определить необходимое количество воды в системе водоснабжения. На основе этих данных можно сформулировать требования по условиям подготовки воды и её подачи в систему водоснабжения прокатных станков.

Разработанные математические модели использовали для анализа эффективности применяемого процесса охлаждения полосы. Установлена зависимость количества воды в системах водоснабжения от способа её подачи, а также возможность использования наиболее эффективной системы охлаждения, которая обеспечивает современный технологический режим прокатки листа в непрерывном технологическом цикле, что соответствует современному мировому уровню.

ВЫВОДЫ

На основе теоретического анализа разработаны математические модели теплового состояния полосы и валков при горячей прокатке листового материала, позволяющие рассчитать тепловое состояние объектов с распределёнными параметрами на всех участках технологического процесса. Полученные модели можно использовать для анализа эффективности применяемого процесса охлаждения полосы, установления зависимости количества воды в системах водоснабжения от способа её подачи, а также выбора наиболее эффективной системы охлаждения. Выполненные исследования могут служить основой для решения задач создания прокатного оборудования IV поколения, а также реконструкции действующих станков горячей прокатки листа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hendricks C. Start-up and initial experience with the casting-rolling plant of The Krupp Stahl AG [Text] / C. Hendricks, W. Rasim, H. Janssen // *La Revue Metallurgie*. – CIT, 2001. – № 78. – P. 633–666.
2. Деглер М. Новые технические разработки в области горячей прокатки полосы [Текст] / М. Деглер, У. Тамлер // *Чёрные металлы*. – 2001. – № 10. – С. 15–17.
3. Control of the temperature of the bar on entry to the finisher [Text] / A. De Paepe, P. Simon, I. Moerkerke, C. Herman // *Ecs Steel Rtd Pogramme*. – 2000. – P. 1–9.
4. Пантелеят Г. С. Управление водоснабжением прокатных станков по критерию экономии энергии [Текст] / Г. С. Пантелеят, Н. В. Салтавец // *Науковий вісник будівництва*. – Харків : ХДУБА, ХОТВ АБУ, 2003. – Вип. 12. – С. 70–73.
5. Салтавец В. І. Розробка математичної моделі теплового стану металу під час прокатки [Текст] / В. І. Салтавец, Н. В. Салтавец // *Науковий вісник будівництва*. – Харків : ХДУБА, ХОТВ АБУ, 2003. – Вип. 21. – С. 162–169.
6. Increase in hot mill roll life [Text] / W. Saltavets, N. Kirjukhin, W. Luke, W. Liddle // *43 Mechanical Working and Steel Processing Conference*. – Charlotte, North Carolina, USA. – Oct. 2001. – P. 437–449.
7. Коздоба Л. А. Методы решения обратных задач теплопереноса [Текст] / Л. А. Коздоба, П. Г. Круковский. – Киев : Наук. думка, 1982. – 360 с.
8. Тришевський О. І. Система реєстрації температури в процесах обробки металів тиском [Текст] / О. І. Тришевський, М. В. Салтавец // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – С. 107–110.
9. Матвеев Б. Н. Совершенствование непрерывного производства горячекатаной широкополосной стали [Текст] / Б. Н. Матвеев // *Производство проката*. – 2002. – № 4. – С. 17–24.

Тришевский О. И. – д-р техн. наук, проф. ХНТУСХ;

Салтавец Н. В. – инженер ХНТУСХ.

ХНТУСХ – Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко, г. Харьков.

E-mail: 3shev@.ukr.net