



УДК 697.1:662.613.5:635.048

[https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2\(23\).2026.33](https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2(23).2026.33)

ОБОГРЕВ ТЕПЛИЦЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛА ШЛАМА ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ (ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ)

Б.С. Жапакова

Кыргызский Государственный технический университет имени И.Раззакова,
Кыргызская Республика, 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66.

*e-mail: burul.japakova@kstu.kg

Н.Ы. Темирбаева

Кыргызский Государственный технический университет имени И.Раззакова,
Кыргызская Республика, 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66.

*e-mail: kissia2009@mail.ru

Ы. Ж. Осмонов

Кыргызский национальный аграрный университет имени К.И. Скрыбина, 720005,
Кыргызская Республика, г. Бишкек, ул. Медерова, 68.

*e-mail: osmonov.ysman@mail.ru

***Аннотация.** В статье предложены процессы теплопередачи при обогреве теплицы с использованием теплового потенциала шлама тепловых электрических станций в условиях отопительного сезона Кыргызской Республики. Исследовано влияние температуры шлама, почвы и внутреннего воздуха теплицы на формирование устойчивого теплового режима защищенного грунта.*

Представлены результаты, что температура шлама ТЭС в пределах 60-70 °С обеспечивает достаточную теплопроизводительность для покрытия тепловой нагрузки тепличного хозяйства средней площади.

В ходе эксперимента изучено распределение тепловых потоков через почву, стены, крышу теплицы и окружающий грунт с учетом конвективного и лучистого теплообмена. Определены основные составляющие теплового баланса теплицы, включая теплопотери через ограждающие конструкции, инфильтрацию воздуха и нагрев приточного воздуха. Установлено влияние солнечной радиации и теплоаккумулирующей способности грунта на поддержание требуемой температуры внутри теплицы. Сформирована расчетная схема системы обогрева вида «тепловая мощность шлама - температура почвы - температура воздуха теплицы», позволяющая аналитически описать процесс теплообмена.

Проанализированы зависимости для расчета теплопроизводительности шлама ТЭС, расхода теплоты за отопительный сезон и определения требуемой площади обогрева теплицы. Разработано уравнение теплового баланса системы обогрева теплицы, учитывающее конструктивные параметры теплицы, теплофизические свойства материалов и параметры вентиляции. Обосновано применение низкопотенциального тепла шлама ТЭС в качестве альтернативного источника тепловой энергии для повышения энергетической эффективности тепличных хозяйств.

***Ключевые слова:** теплица, шлам тепловых электрических станций, тепловой расчет, коэффициент теплопередачи, теплопроизводительность.*

UDC 697.1:662.613.5:635.048

THERMAL CALCULATION OF GREENHOUSE HEATING USING SLAG FROM A THERMAL POWER PLANT

B.S. Zhapakova

Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov,
66 Ch. Aitmatov Ave., Bishkek 720044, Kyrgyz Republic

*e-mail: burul.japakova@kstu.kg

N.Y. Temirbaeva



Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov,
66 Ch. Aitmatov Ave., Bishkek 720044, Kyrgyz Republic
*e-mail: kissia2009@mail.ru

Y. Zh. Osmonov

Kyrgyz National Agrarian University named after K. I. Skryabin,
68 Mederov St., Bishkek 720005, Kyrgyz Republic
*e-mail: osmonov.ysman@mail.ru

Abstract. *This paper proposes heat transfer processes for greenhouse heating using the thermal potential of thermal power plant (TPP) sludge during the heating season in the Kyrgyz Republic. The influence of sludge temperature, soil temperature, and greenhouse indoor air temperature on the formation of a stable thermal regime of protected cultivation systems was investigated. The results demonstrate that a sludge temperature within the range of 60–70 °C provides sufficient heat output to meet the thermal demand of a medium-sized greenhouse facility.*

The study examined the distribution of heat flows through the soil, greenhouse walls, roof structures, and surrounding ground, taking into account convective and radiative heat transfer. The main components of the greenhouse heat balance were identified, including heat losses through enclosing structures, air infiltration, and the heating of supply air. The effects of solar radiation and the heat-accumulating capacity of the soil on maintaining the required indoor greenhouse temperature were also determined.

A calculation model of the heating system in the form of “sludge thermal power – soil temperature – greenhouse air temperature” was developed, enabling an analytical description of the heat exchange process. Relationships for calculating the heat output of TPP sludge, seasonal heat consumption, and the required greenhouse heating area were analyzed. A heat balance equation for the greenhouse heating system was developed, taking into account the greenhouse design parameters, thermophysical properties of construction materials, and ventilation characteristics.

The application of low-grade waste heat from TPP sludge as an alternative source of thermal energy was substantiated as an effective approach to improving the energy efficiency of greenhouse production systems.

Key words: *greenhouse, thermal power plant sludge, thermal calculation, heat transfer coefficient, heat productivity.*

Введение

В условиях климатических особенностей Кыргызской Республики, характеризующихся значительными сезонными колебаниями температуры атмосферного воздуха, обеспечение стабильного теплового режима теплиц в холодные периоды года является одним из основных факторов повышения урожайности тепличных хозяйств в течении года.

Использование теплового потенциала шлама тепловых электрических станций (ТЭС) для нужд сельского хозяйства, в частности, для обогрева защищенного грунта теплиц, актуально, отвечает требованием энергосбережения, может дать эколого-экономической эффект и является одним из путей интеграции энергетики и сельского хозяйства в вопросе использования отработанного низкопотенциального тепла ТЭС.

Результаты исследований показывают, что практическое использование теплового потенциала шлама ТЭС для обогрева защищенного грунта теплиц вполне возможно, так как температура шлама составляет 60–70 °C, имеет тепловую мощность достаточную для обеспечения тепловой нагрузки среднего тепличного хозяйства. При средней удельной нагрузке тепличного хозяйства около 220 Вт/м² и тепловой мощности шлама ТЭС порядка 2 МВт, расчетная площадь обогрева почвы теплицы составляет 1 гектар [1].

В агротехнических требованиях приведена оптимальная температура воздуха внутри теплицы с учетом дифференциала $24 \pm 2^\circ\text{C}$ [2]. Существующие способы обогрева теплиц в



холодные периоды года (в отопительный сезон: с 15 октября по 15 марта), когда температура атмосферного воздуха снижается до $+10^{\circ}\text{C}$, имеет ряд недостатков: большой расход топлива, электроэнергии, газа, суточные перепады температуры воздуха внутри теплицы, образование конденсата на внутренней поверхности ограждающих конструкций и т.п..

Цель исследования-разработка методики теплового расчета обогрева почвы теплиц, где обогрев осуществляется путем использования теплового потенциала шлама теплоэлектрических станций.

Методы и материалы

Конструктивно-технологическая схема теплицы с системой почвенного обогрева представлена на рисунке 1.

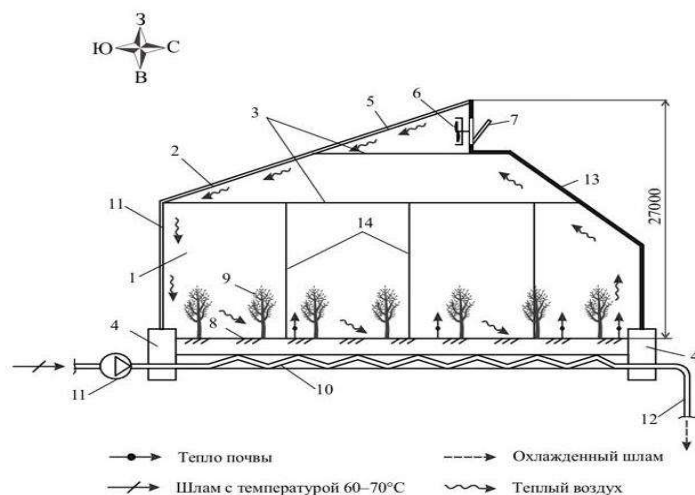


Рис. 1. Схема теплицы с системой почвенного обогрева

1- теплица; 2- южная часть теплицы; 3-каркас; 4- фундамент; 5- пленочные покрытие; 6- вентилятор; 7- окна; 8- почва; 9- растения; 10- трубопровод; 11- насос; 12- сливная труба; 13- северная часть теплицы; 14- торцевые стороны теплицы.

При строительстве теплицы продольная ось должна быть ориентирована с востока на запад, при этом южная часть [2](#) направляется на юг, а северная часть [13](#) - на север. Посадка растений внутри теплицы осуществляется по направлению с юга на север, что обеспечивает более равномерное распределение естественного солнечного света.

Принцип работы системы обогрева теплицы заключается в следующем. При подаче шлама температурой $60-70^{\circ}\text{C}$ по пластиковым трубам [10](#), уложенные в почву [8](#), на глубину 50-60 см с помощью насоса [11](#) происходит постепенное повышение температуры почвы, после чего тепло передается воздуху внутри теплицы. При достижении температуры воздуха $20-24^{\circ}\text{C}$ включаются вентиляторы [6](#) при закрытом положении вентиляционных окон [7](#), в результате чего начинается циркуляция воздуха во внутреннем объеме теплицы.

Теплый воздух перемещается по верхней внутренней поверхности теплицы, обдувает пленку [5](#) и растения [9](#), обеспечивая равномерное распределение температуры. Теплоизоляционный материал фундамента [4](#) предотвращает потери тепла из почвы теплицы в наружный грунт. Непрерывная циркуляция воздуха с поддержанием требуемой температуры оказывает благоприятное воздействие на рост и развитие растений. При повышении температуры воздуха или необходимости замены внутреннего воздуха открываются вентиляционные окна [7](#), через которые избыточно нагретый или отработанный воздух удаляется наружу, что предотвращает перегрев растений.

При подачи шлама в почву в течении суток происходит постепенная аккумуляция тепловой энергии в грунте на глубину 50-60 см. Благодаря теплоаккумулирующей



способности почвы обеспечивается сохранение необходимого температурного режима даже в случае временного прекращения подачи теплоносителя.

Результаты и обсуждение

Рассматриваемый процесс обогрева почвы теплицы имеет систему следующего вида: «Тепловая мощность шлама (ТШ)- температура почвы (ТП)- температура воздуха теплицы (ТТ)», (ТШ-ТП-ТТ) (рисунок 2).

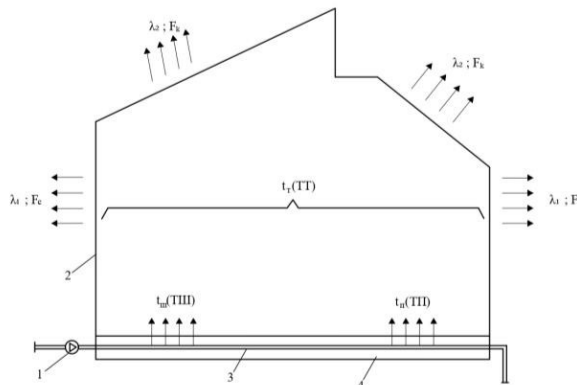


Рис. 2. Система обогрева теплицы

1-насос; 2-теплица; 3- трубопровод; 4- почва (защищенный грунт).

Поскольку теплица обогревается в отопительный сезон, существует неравенства:

$$t_{ш} \geq t_{п} \geq t_{т} > t_{в}, \quad (1)$$

где $t_{ш}$, $t_{п}$, $t_{т}$, $t_{в}$ - соответственно температуры шлама, почвы, теплицы и наружного воздуха, °С.

В процессе работы данной системы тепловой поток шлама $Q_{ш}$, через почву направляется внутрь теплицы, далее из теплицы- наружу. В результате возникает следующие ситуации (рисунок 3):

- восприятие теплоты шлама ($Q_{ш}$) почвой ($Q_{п1}$) и переход ее через толщу почвы, во внутренний объем теплицы($Q_{в1}$), ($Q_{ш} \rightarrow Q_{п1} \rightarrow Q_{в1}$);
- восприятие теплоты ($Q_{в1}$) внутренней поверхностью стен ($Q_{с1}$) теплицы и переход ее через толщу стен в наружу ($Q_{н1}$) ($Q_{в1} \rightarrow Q_{с1} \rightarrow Q_{н1}$);
- восприятие теплоты ($Q_{в2}$) внутренней поверхности крыши ($Q_{к2}$) теплицы и переход ее через толщу крыши ($Q_{н2}$) ($Q_{в2} \rightarrow Q_{к2} \rightarrow Q_{н2}$);
- отдача теплоты в грунт ($Q_{г}$).

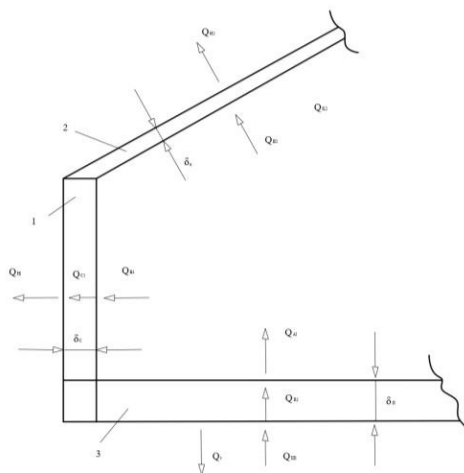


Рис. 3. Схема теплоотдачи через почву, стену и крышу теплицы, а также в грунт. 1-стена; 2-крыша; 3- почва; $\delta_{п}$, $\delta_{с}$, $\delta_{к}$ - толщина грунта; стены и крыши теплицы, соответственно.



При определении количества теплоты воспринимаемой почвой $Q_{п1}$, внутренней поверхностью стен $Q_{в1}$ и крышей $Q_{в2}$ теплицы принимаем допущения: температура поверхностей всех элементов (стен, крыша, почва) постоянно в любой их точке, количество теплоты данных элементов складывается из конвективного и лучистого теплообмена. Данное допущение позволяет определить величины $Q_{п1}$, $Q_{в1}$ и $Q_{в2}$ с помощью формулы Ньютона-Рихмана [3,4]:

$$Q_{п1} = \alpha_B^п (t_п - t_B) (F_п \tau), \quad (2)$$

$$Q_{в1} = \alpha_B^с (t_Т - t_B) (F_с \tau), \quad (3)$$

$$Q_{в2} = \alpha_B^к (t_Т - t_B) (F_к \tau), \quad (4)$$

где $\alpha_B^п$, $\alpha_B^с$, $\alpha_B^к$ - суммарный коэффициент тепловосприятия почвы, внутренней поверхности стен и крыши теплицы, соответственно, $\text{кДж/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}$;

$F_п, F_с, F_к$ - площади пола, стен и крыши теплицы, м^2 ;

τ - время обогрева почвы.

Коэффициенты $\alpha_B^п$, $\alpha_B^с$, $\alpha_B^к$ складываются из собственных конвективных и лучистых теплообмена: $\alpha_B^п = \alpha_{к.в}^п + \alpha_{л.в}^п$; $\alpha_B^с = \alpha_{к.в}^с + \alpha_{л.в}^с$; $\alpha_B^к = \alpha_{к.в}^к + \alpha_{л.в}^к$.

Количество теплоты, проходящей через толщу почвы $Q_{п1}$, стен $Q_{с1}$ и крыши $Q_{к2}$ теплицы равны:

$$Q_{п1}' = \frac{\lambda_п}{\delta_п} (t_п - t_B) F_п \cdot \tau, \quad (5)$$

$$Q_{с1} = \frac{\lambda_1}{\delta_с} (t_Т - t_B) F_с \cdot \tau, \quad (6)$$

$$Q_{к2} = \frac{\lambda_2}{\delta_к} (t_Т - t_B) F_к \cdot \tau, \quad (7)$$

где $\lambda_п, \lambda_1, \lambda_2$ - коэффициенты теплопередачи почвы, стен и крыши теплицы, соответственно, $\text{кДж/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}$.

Переход системы обогрева теплицы в установившийся режим характеризуется следующими равенствами:

$$Q_{ш1} = Q_{п1} = Q_{п1}'; \quad Q_{в1} = Q_{с1} = Q_{н1}; \quad Q_{в2} = Q_{к2} = Q_{н2}. \quad (11)$$

Основные теплопотери теплицы при установившемся режиме обогрева составляют сумму $Q_с + Q_к$, где $Q_с$ - теплопотери через стены, $Q_к$ - теплопотери через крышу теплицы.

Кроме этих основных потерь, в теплице имеет место потери на нагрев приточного воздуха $Q_{пр}$ при замене отработанного воздуха и на инфильтрацию воздуха $Q_{ин}$:

$$Q_{пр} = [W \cdot \rho_B \cdot C (t_Т - t_B)] \tau, \quad (12)$$

$$Q_{ин} = [0,3 (Q_с + Q_к)], \quad (13)$$

где W - воздухообмен теплицы, $\text{м}^3/\text{ч}$; ρ_B - плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; C - теплоемкость воздуха, $\text{кДж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$.

Тепловой расчет обогрева теплицы также учитывает теплоту от солнечной радиации в зависимости от географической широты местности $Q_{ис}$:

$$Q_{ис} = q \cdot F_{ос} \cdot a_c, \quad (14)$$

где q - величина радиации, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

$F_{ос}$ - площадь остекления, м^2 ;

a_c - коэффициент, учитывающий остекление.

Таким образом уравнение теплового баланса обогрева теплицы имеет следующий вид:

$$Q_{ш1} = (Q_с + Q_к + Q_{пр} + Q_{ин}) - Q_{ис}, \quad (15)$$

где $Q_{ш1}$ - тепловой поток, поступающий в теплицу от шлама ТЭС.

Составляющие уравнения (15) равны:

$$Q_с = \alpha_B^с (t_Т - t_B) F_с \cdot \tau = \frac{\lambda_1}{\delta_с} (t_Т - t_B) F_с \tau = \alpha_н^с (t_Т - t_B) F_с \cdot \tau; \quad (16)$$

$$Q_к = \alpha_B^к (t_Т - t_B) F_к \cdot \tau = \frac{\lambda_2}{\delta_к} (t_Т - t_B) F_к \tau = \alpha_н^к (t_Т - t_B) F_к \cdot \tau; \quad (17)$$



Путем математических преобразований уравнений (16) и (17) имеем [5,6]:

$$Q_c = \frac{t_T - t_B}{\frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_c}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_H}} F_c \cdot \tau, \quad (18)$$

$$Q_K = \frac{t_T - t_B}{\frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_K}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_H}} F_K \cdot \tau, \quad (19)$$

Аналогично определяется количества тепла воспринимаемой почвой от шлама:

$$Q_{п1} = \frac{t_T - t_B}{\frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_{п1}}{\lambda_{п1}} + \frac{1}{\alpha_K}} F_{п1} \cdot \tau \approx Q_{ш1}, \quad (20)$$

Подставляя (12), (13), (14), (18), (19) и (20) в уравнение теплового баланса теплицы (15) имеем:

$$Q_{ш1} = \left\{ \frac{t_T - t_B}{\frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_c}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_H}} F_c \cdot \tau + \frac{t_T - t_B}{\frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_K}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_H}} F_K \cdot \tau + \alpha_H (t_{п1} - t_B) F_{п1} \cdot \tau + [W \cdot \rho_B \cdot C (t_T - t_B)] \tau + [0,3 (Q_c + Q_K)] \tau \right\} - q_{ос} a_K, \quad (21)$$

Уравнение (21) позволяет определить теплопроизводительность шлама ТЭС ($Q_{ш1}$) в зависимости от температуры атмосферного воздуха (t_B , °C) и является эквивалентным теплопроизводительности системы «ТШ-ТП-ТТ», ($Q_{со}$), то есть $Q_{ш1} = Q_{со}$, МДж.

В уравнении (21) параметры $t_{п1}, t_B, F_c, F_K, \tau, q, F_{ос}, F_{п1}, F_c, F_K, \delta_c, \delta_K, \delta_{п1}$ являются измерениями, параметры t_T, α_K - нормативные, коэффициенты $\alpha_B^c, \alpha_H^c, \alpha_B^K, \alpha_H^K, \alpha_H^T, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_{п1}, \rho_B, C$ справочные [7,8,9], а воздухообмен W теплицы определяется расчётным путем с помощью общественных зависимостей и является исходной величиной для выбора мощности вентилятора и для компоновки всей системы вентиляции теплицы.

Уравнения (21) также позволяет определить тепловую мощность шлама ТЭС :

$$P_{ш} = \frac{Q_{ш1}}{\tau}, \text{ кВт} \quad (22)$$

Расход теплоты за отопительный сезон:

$$G_T = \frac{P_{ш}(t_T - t_B) 24 \tau_{ос}}{(t_T - t_B)}, \quad (23)$$

где $\tau_{ос}$ - продолжительность отопительного сезона, сутки [10];
и требуемую площадь теплицы:

$$F_T = \frac{a P_{ш}}{\lambda_{п1} \Delta t \tau}, \quad (24)$$

где a - коэффициент запаса;

Δt - разность средних температур на входе и выходе из почвы теплицы, °C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработана и обоснована методика теплового расчета системы обогрева теплицы, основанная на энергетической взаимосвязи «тепловая мощность шлама – температура почвы – температура воздуха теплицы», позволяющая аналитически описать формирование теплового режима защищенного грунта в течение отопительного периода.

Проведен анализ процессов теплопередачи в системе «шлам ТЭС – почва – воздух теплицы» с учетом конвективного и лучистого теплообмена, а также теплопроводности через грунт и ограждающие конструкции теплицы.

Выявлено распределение тепловых потоков в элементах теплицы, при котором основные теплопотери формируются через ограждающие конструкции и зависят от их теплофизических характеристик, толщины и коэффициентов теплопередачи.

Определена роль почвы как теплоаккумулирующей среды, обеспечивающей стабилизацию температурного режима и сглаживание суточных колебаний температуры воздуха внутри теплицы.

Установлено, что солнечная радиация выступает дополнительным источником теплопритока, частично компенсирующим тепловые потери и снижающим потребность в тепловой мощности системы обогрева.

Сформировано уравнение теплового баланса теплицы, учитывающее теплопритоки от шлама ТЭС, теплопотери через ограждающие конструкции, инфильтрацию и вентиляцию



воздуха, а также поступление солнечной радиации, что позволяет выполнять комплексный инженерный расчет теплового режима теплицы.

Разработаны зависимости для определения теплопроизводительности системы обогрева, расхода теплоты за отопительный сезон и требуемой площади теплицы, обеспечивающие количественную оценку эффективности использования низкопотенциального тепла шлама тепловых электрических станций.

Обосновано, что использование шлама ТЭС в качестве источника тепловой энергии для тепличных хозяйств повышает энергоэффективность агропромышленного комплекса, способствует утилизации вторичных энергетических ресурсов и обеспечивает устойчивый микроклимат для выращивания сельскохозяйственных культур в холодный период года.

Литература

1. Рахматов, О.И., Абдурахмонова, Н.К. Расчет теплового баланса гелиотеплицы. *Muqobil energetika / Альтернативная энергетика*. 2024. No. 1(12).
2. СН КР 31-03:2019. Теплицы и парники / Госстрой КР. – Введ. 2019-10-01. – Бишкек: Государственное агентство архитектуры, строительства и жилищно-коммунального хозяйства при Правительстве Кыргызской Республики, 2019. – 24 с.
3. Интропера, Ф.П., Де Витт, Д.П. Основы тепло- и массообмена. – М.: Лаборатория знаний, 2011. – 784 с.
4. Çengel, Y.A., Ghajar, A.J. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. – New York: McGraw-Hill Education, 2015. – 983 p.
5. Modeling of greenhouse radiant heating. MATEC Web of Conferences. 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201819303006.
6. Корн, Г., Корн, Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров): перевод с английского / под редакцией А.А. Арамановича. – 5-е изд. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 831 с.
7. Bredenbeck, H. The use of waste heat from a power plant for greenhouse heating. *Acta Horticulturae*. 1992. Vol. 312. pp. 29–36. DOI: 10.17660/ActaHortic.1992.312.3.
8. Radiative heat loss inside a greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1987. Vol. 37. pp. 155–162.
9. GREENHEAT model for greenhouse heating requirements. *Information Processing in Agriculture* (Elsevier). 2018.
10. Абдиева, З., Осмонов, Ы., Касмамбетов, Х., Садыков, М., Тампагаров, К. Развитие автономного электроснабжения сельских потребителей на основе возобновляемых источников электроэнергии. *Вестник Ошского государственного университета. Математика. Физика. Техника*. 2024. No. 2(5). pp. 225–230. DOI: 10.52754/16948645_2024_2(5)_27.