

УДК 631.344.8

ПАВЛОВ МИХАИЛ ВАСИЛЬЕВИЧ, ст. преподаватель,
pavlov_kaftgv@mail.ru
ЛУКИН СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
s.v.luk@yandex.ru
КОЧКИН АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ, докт. техн. наук, доцент,
aakochkin@mail.ru
Вологодский государственный университет,
160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛУЧИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ ТЕПЛИЦЫ

Предложена методика расчета системы лучистого отопления теплицы, учитывающая теплообмен излучением между поверхностью почвы и ограждением теплицы, многократные процессы отражения теплового излучения и самооблучения, а также массообменные процессы. Получены уравнения теплового и материального балансов теплицы и поверхности почвы, а также уравнение теплового баланса ограждения теплицы. Приведены расчетные выражения для определения отдельных статей уравнений теплового и материального балансов. Для нахождения основных показателей лучистого отопления теплицы необходимо совместное численное решение данных уравнений.

Ключевые слова: лучистое отопление; тепловой баланс; материальный баланс; теплица; инфракрасный излучатель; почва.

MIKHAIL V. PAVLOV, Senior Lecturer,
pavlov_kaftgv@mail.ru
SERGEY V. LUKIN, DSc, Professor,
s.v.luk@yandex.ru
ALEKSANDR A. KOCHKIN, DSc, A/Professor,
aakochkin@mail.ru
Vologda State Technical University,
15, Lenin Str., 160000, Vologda, Russia

MATHEMATICAL MODEL OF GREENHOUSE RADIANT HEATING

The paper presents a methodology for calculating greenhouse radiant heating with regard to radiant heat transfer between the soil surface and greenhouse walls, multiple processes of heat reflection and self-irradiation, and mass transfer processes. Balance equations are obtained for heat and mass transfer between the greenhouse and soil surface and the heat transfer in greenhouse walls. The paper gives calculation formulae for determining certain elements of heat and mass balance equations. Joint numerical solution of these equations is required for calculating main indices of greenhouse radiant heating.

Keywords: radiant heating; heat balance; mass balance; greenhouse; infrared emitter; soil.

Как отмечено в работе [1], при большом многообразии конструкций теплиц и отопительного оборудования не всегда удается подобрать оптималь-

ный вариант обогрева помещений, который одновременно будет и энергоэффективным, и сможет обеспечить необходимые условия для выращивания растений в закрытом грунте. Так, авторы в статьях [2, 3] рассматривают воздушное отопление теплицы с утилизацией теплоты дымовых газов, уходящих из твердотопливной кирпичной печи. При этом нагретый в печи воздух, проходя через систему подпочвенных каналов, отдает часть теплоты окружающей их почве. Применение такой системы обогрева имеет ряд недостатков: использование громоздкой дорогостоящей печи со встроенным в нее газоздушным теплообменным аппаратом; проблема поддержания и регулирования теплового режима почвы; трудозатратная прокладка в слое почвы бетонных каналов большой протяженности (в статье их общая длина составляет 50 м), нарушающих ее естественное сложение. Кроме того, большое количество выбросов вредных веществ в атмосферу создает неблагоприятную экологическую обстановку как для выращивания сельскохозяйственных растений в теплице, так и для жизни людей на прилегающей к ней территории. Тепличное овощеводство, особенно в промышленных масштабах, не должно оказывать негативное воздействие (прямое или косвенное) на человека и окружающую среду [4]. Оригинальный способ воздушного отопления теплицы с использованием геотермального источника энергии предложен в работе [5]. Сетевая вода как промежуточный теплоноситель вначале нагревается в теплообменнике, где греющей средой является геотермальная вода, а затем отдает полученную теплоту воздуху через калориферы, установленные непосредственно в теплице. Дороговизна всей нагревательной системы (производственные скважины геотермальной воды, сепараторы, фильтры и мн. др.) и техническая сложность самого проекта (заглубление скважин в грунт, строительство целого здания рядом с теплицей для установки энергогенерирующего комплекса) сдерживают возможные варианты его реализации на практике. Стоит отметить, что помимо выбора системы обогрева теплицы грамотное в инженерном плане расположение ее отдельных помещений, ряд рациональных конструктивных решений могут также повысить ее уровень энергоэффективности [6]. Особенно это актуально при круглогодичном выращивании растений, саженцев и рассады, хранении урожая и т. п.

В настоящее время наряду с традиционными системами обогрева теплиц большое распространение получили системы лучистого отопления. В статье [7] приводится описание подобной отопительной системы на примере тепличного комплекса, расположенного в поселке Махве штата Нью-Джерси (США). На одном акре земли (территория площадью более 4000 м²) выращивают многообразные многолетние растения, цветы (тропические гибискусы) в подвесных корзинах, кустарники и травы. Опыт зарубежных стран уже давно перенят Россией. Во многих теплицах нашей страны для получения в короткие сроки урожая ягод, зелени и овощей используют инфракрасные излучатели. Прежде всего, это касается северных территорий с непродолжительным летним временем и недостаточным количеством солнечного света, способного быстро прогреть почву. Важной особенностью лучистого отопления теплиц является поддержание и регулирование температуры почвы бесконтактным, неразрушающим способом. Различные сельскохозяйственные

культуры в разные периоды (эмбриональный, до плодоношения, после плодоношения) требуют соответствующий тепловой режим почвы¹. Этого позволяют достичь системы лучистого отопления теплиц с инфракрасными излучателями. Другие преимущества лучистого отопления не менее значительны [8]: сокращение расходов топливно-энергетических ресурсов на нужды отопления за счет направленного инфракрасного излучения; отсутствие необходимости в дополнительном увлажнении воздуха, т. к. излучатели не сушат воздух; имитация солнечного теплового излучения; возможность создания в одной теплице нескольких зон с разными температурными режимами и др.

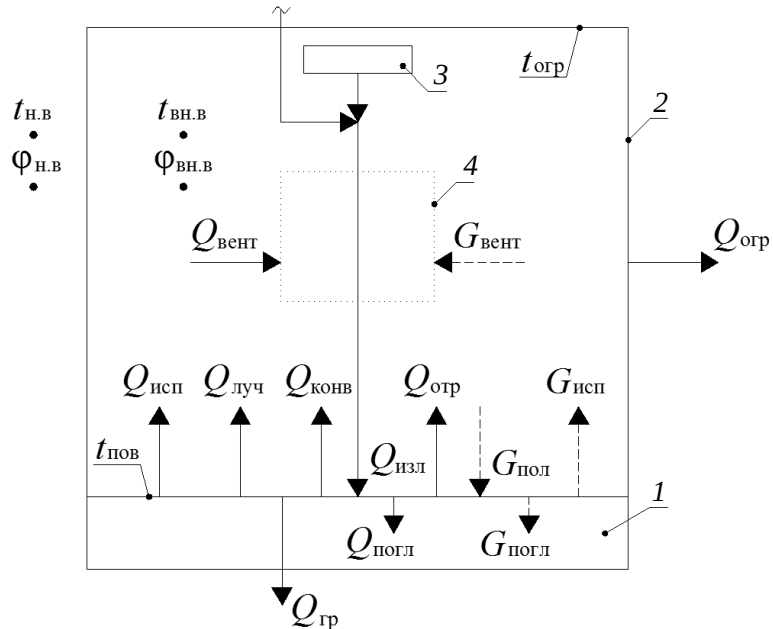
Вместе с применением высокотехнологичных систем лучистого отопления возникает необходимость в их моделировании. Конечным результатом математических расчетов является определение требуемой мощности теплового излучения, необходимого расхода воды на полив почвы, параметров микроклимата и др. Моделирование теплового баланса на примере солнечной теплицы с пассивным аккумулятором теплоты рассмотрено в работе [9]. Автор в статье [10] дает описание системы инфракрасного обогрева теплицы с использованием электрических длинноволновых нагревательных панелей. В ней также приводится методика расчета и проектирования такой системы отопления для различных производственных помещений. Она учитывает потери теплоты в теплице через ее ограждающие конструкции (стены, пол, крышу) и на вентиляцию. Однако, на наш взгляд, данная математическая модель лучистого отопления получилась не совсем полной, т. к. она, например, не рассматривает теплообмен излучением между телами (в статье только рассмотрено тепловое облучение головы человека), массообменные процессы (испарение влаги с поверхности почвы, потерю влаги при воздухообмене).

На рисунке представлена схема теплового и материального балансов теплицы при лучистом отоплении.

В соответствии с рисунком поток теплового излучения $Q_{изл}$, Вт, идущий от излучателя 3 (и от солнца в теплый период года, условно не показано), падает на поверхность почвы 1 с температурой $t_{пов}$, °С. Тепловой поток $Q_{полг}$, поглощенный почвой 1, расходуется на конвективный теплообмен с внутренним воздухом теплицы $Q_{конв}$, на лучистый теплообмен с внутренней поверхностью ограждения 2 $Q_{луч}$, имеющей температуру $t_{огр}$, и на испарение влаги $Q_{исп}$. Часть теплоты величиной $Q_{гр}$ уходит в глубинные горизонты грунта. Тепловые потери в теплице также связаны с теплопередачей через ограждение 2 $Q_{огр}$ и с воздухообменом в помещении $Q_{вент}$. Отраженный от поверхности почвы 1 тепловой поток $Q_{отр}$ в ходе многократных отражений и самооблучений поглощается ограждением 2 теплицы. При поливе почвы водой в объеме $G_{пол}$, кг/с, происходит поглощение влаги растениями (листьями и корневой системой, условно не показаны) $G_{полг}$. Влага расходом $G_{исп}$,

¹ РД-АПК 1.10.09.01-14. Методические рекомендации по технологическому проектированию теплиц и тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады.

испарившаяся с поверхности почвы 1, уходит из теплицы в количестве $G_{\text{вент}}$ вместе с вытяжным воздухом через вентиляционный проем 4. Температура и относительная влажность воздуха в теплице соответственно равны $t_{\text{вн.в}}$ и $\phi_{\text{вн.в}}$, %, те же параметры для наружного воздуха – $t_{\text{н.в}}$ и $\phi_{\text{н.в}}$.



Расчетная схема теплового и материального балансов теплицы при лучистом отоплении:
 1 – почва; 2 – ограждение; 3 – источник инфракрасного излучения (излучатель);
 4 – вентиляционный проем (приточный / вытяжной)

При математическом моделировании лучистого отопления теплицы введен ряд допустимых упрощений:

1. Предполагается, что излучатель 3 только испускает тепловое излучение величиной $Q_{\text{изл}}$ и в дальнейшем в теплообмене с другими телами уже не участвует. Причем все тепловое излучение, переданное излучателем 3, равномерно распределяется по всей поверхности почвы 1.

2. В сравнении с протяженными телами, которыми в данном случае являются почва 1 и ограждение 2 теплицы, излучатель 3 представляет собой точечный источник теплоты.

3. Тепловой поток $Q_{\text{изл}}$, идущий от излучателя 3, и тепловой поток от результирующего теплового излучения $Q_{\text{луч}}$ между поверхностью почвы 1 и внутренней поверхностью ограждения 2 теплицы рассматриваются отдельно (независимо) друг от друга.

4. Все тела, участвующие в лучистом теплообмене, являются непрозрачными, и для них коэффициент пропускания $D = 0$. Таким образом, имеет место соотношение $A + R = 1$, где A и R – соответственно коэффициенты поглощения и отражения серого тела.

5. Для всех тел соответствующие им коэффициенты поглощения A и излучения ε равны между собой (закон Кирхгофа).

Уравнение теплового баланса теплицы при лучистом отоплении, Вт, согласно рисунку, имеет следующий вид:

$$Q_{\text{изл}} = Q_{\text{огр}} + Q_{\text{вент}} + Q_{\text{гр}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{изл}}$ – суммарный тепловой поток, идущий от излучателя 3 и солнца (в теплый период года), Вт; $Q_{\text{огр}}$ – потери теплоты через ограждение 2 теплицы, Вт; $Q_{\text{вент}}$ – потери теплоты с вентиляционным воздухом, уходящим из теплицы через вытяжной вентиляционный проем 4, Вт; $Q_{\text{гр}}$ – потери теплоты в грунт, Вт.

В связи со спецификой лучистого отопления тепловые потери $Q_{\text{огр}}$ и $Q_{\text{гр}}$ рассчитываются соответственно по формулам, Вт:

$$Q_{\text{огр}} = \frac{t_{\text{огр}} - t_{\text{н.в}}}{R_t} F_{\text{огр}} (1 + \beta_{\text{инф}}), \quad (2)$$

$$Q_{\text{гр}} = (t_{\text{пов}} - t_{\text{н.в}}) \sum_{i=1}^{\text{IV}} \left(\frac{F_i}{R_{t,i} - 1/\alpha_{\text{вн}}} \right), \quad (3)$$

где $R_t = R_{\text{огр}} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}$ – термическое сопротивление теплопередаче ограждения 2, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; $R_{\text{огр}}$ – термическое сопротивление ограждения 2, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждения 2, $23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $F_{\text{огр}}$ – суммарная площадь ограждения 2 теплицы, м^2 ; $\beta_{\text{инф}}$ – коэффициент инфильтрации наружного воздуха, для теплиц можно принять равным 0,2; F_i – расчетная площадь i -й зоны грунта, м^2 ; $R_{t,i}$ – термическое сопротивление i -й зоны грунта, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$. Для первой зоны равно $R_{t,\text{I}} = 2,1 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; для второй – $R_{t,\text{II}} = 4,3 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; для третьей – $R_{t,\text{III}} = 8,6 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; для четвертой – $R_{t,\text{IV}} = 14,2 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; $\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждения 2 теплицы, $8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Трудность нахождения теплового потока $Q_{\text{огр}}$ по формуле (2) связана с неизвестной температурой $t_{\text{огр}}$, которая, в отличие от традиционных систем отопления, определяется через решение системы уравнений теплового баланса внутренней поверхности ограждения 2 теплицы. При этом первым уравнением является выражение (2), а вторым

$$Q_{\text{огр}} = \left(1 - \frac{A_1}{1 - k_{\text{отр}}} \right) Q_{\text{изл}} + Q_{\text{луч}} + Q_{\text{конв2}}, \quad (4)$$

где $k_{\text{отр}} = (1 - A_1)(1 - A_2) \frac{\varphi_{21}}{1 - \varphi_{22}(1 - A_2)}$ – коэффициент, учитывающий многократное отражение теплового излучения от поверхности почвы 1 и внутренней поверхности ограждения 2 теплицы в результате самооблучений; A_1 и A_2 – соответственно коэффициенты поглощения поверхности почвы 1 и внутренней поверхности ограждения 2 теплицы; φ_{21} – коэффициент облученности с внутренней поверхности ограждения 2 теплицы на поверхность почвы 1; φ_{22} – коэффициент самооблученности внутренней поверхности ограждения 2; $Q_{\text{луч}}$ – результирующий тепловой поток от теплообмена излучением между поверхностью почвы 1 и внутренней поверхностью ограждения 2 теплицы, Вт; $Q_{\text{конв2}}$ – тепловой поток от конвективного теплообмена между внутренним воздухом и внутренней поверхностью ограждения 2 теплицы, Вт.

Результирующий тепловой поток $Q_{\text{луч}}$ от теплообмена излучением между поверхностью почвы 1 и внутренней поверхностью ограждения 2 теплицы при условии, что $t_{\text{пов}} > t_{\text{отр}}$ и $\varphi_{12} = 1$ (все тепловое излучение, идущее с поверхности почвы 1, попадает на внутреннюю поверхность ограждения 2 теплицы), определяется по формуле, Вт

$$Q_{\text{луч}} = c_0 \varepsilon_{\text{пр12}} F_{\text{пов}} \left[\left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{отр}}}{100} \right)^4 \right], \quad (5)$$

где c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, 5,67 Вт/(м²·К⁴); $\varepsilon_{\text{пр12}}$ – приведенный относительный коэффициент теплового излучения поверхности почвы 1 и внутренней поверхности ограждения 2 теплицы; $F_{\text{пов}}$ – площадь поверхности почвы 1, м²; $T_{\text{пов}} = t_{\text{пов}} + 273,15$ и $T_{\text{отр}} = t_{\text{отр}} + 273,15$ – соответственно абсолютная температура поверхности почвы 1 и внутренней поверхности ограждения 2, К.

Конвективная составляющая теплообмена между внутренним воздухом и внутренней поверхностью ограждения 2 теплицы рассчитывается по закону конвективного теплообмена (по закону Ньютона – Рихмана), Вт:

$$Q_{\text{конв2}} = \alpha_{\text{вн}} (t_{\text{вн.в}} - t_{\text{отр}}) F_{\text{отр}}. \quad (6)$$

Дополнительная сложность определения температуры $t_{\text{отр}}$ заключается в том, что тепловой поток $Q_{\text{изл}}$ входит как в уравнение (4), так и уравнение (1), где он является искомой величиной.

Потери теплоты с уходящим вентиляционным воздухом $Q_{\text{вент}}$, Вт, численно равны расходу теплоты, который идет на нагрев приточного воздуха, поступающего в теплицу через ее вентиляционный проем 4, т. е.:

$$Q_{\text{вент}} = G_{\text{в}} (h_{\text{вн.в}} - h_{\text{н.в}}), \quad (7)$$

где G_v – массовый расход сухой части влажного воздуха, участвующего в воздухообмене в теплице, кг/с; $h_{вн.в}$ и $h_{н.в}$ – соответственно удельная энтальпия внутреннего и наружного влажного воздуха, Дж/кг.

Уравнение теплового баланса деятельной поверхности почвы 1 с учетом многократных отражений теплового излучения и самооблучений внутренней поверхности ограждения 2 теплицы выглядит следующим образом, Вт:

$$\frac{A Q_{изл}}{1 - k_{отр}} = Q_{конв1} + Q_{луч} + Q_{исп} + Q_{гр}, \quad (8)$$

где $Q_{конв1}$ – тепловой поток, вызванный конвективным теплообменом между поверхностью почвы 1 и приземным слоем воздуха в теплице (на рисунке обозначен как $Q_{конв}$), Вт; $Q_{исп}$ – тепловой поток, расходуемый на испарение влаги с поверхности почвы 1, Вт.

Конвективный теплообмен между поверхностью почвы 1 и приземным слоем воздуха в теплице, Вт, подчиняется закону Ньютона – Рихмана:

$$Q_{конв1} = \alpha_k (t_{пов} - t_{вн.в}) F_{пов}, \quad (9)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи поверхности почвы 1, Вт/(м²·К).

Тепловой поток $Q_{исп}$, связанный с процессом парообразования на поверхности почвы 1, Вт, рассчитывается по уравнению

$$Q_{исп} = G_{исп} r, \quad (10)$$

где $G_{исп}$ – испарение влаги с поверхности почвы 1, кг/с; r – удельная теплота фазового превращения (перехода), Дж/кг.

Методика расчета величины $G_{исп}$ будет рассмотрена в дальнейшем при описании материального баланса теплицы при лучистом отоплении.

Решение системы уравнений теплового баланса теплицы (1) и деятельной поверхности почвы 1 (8) с учетом системы уравнений (2) и (4) позволяет найти следующие искомые величины: температуру внутренней поверхности ограждения 2 теплицы $t_{огр}$, температуру $t_{вн.в}$ и относительную влажность $\phi_{вн.в}$ внутреннего воздуха в теплице, а также требуемую мощность теплового излучения $Q_{изл}$, идущего от излучателя 3.

Уравнение материального баланса теплицы при лучистом отоплении можно представить следующим образом, кг/с:

$$G_{исп} = G_{вент}, \quad (11)$$

где $G_{исп}$ – испарение влаги с поверхности почвы 1, кг/с; $G_{вент}$ – потеря влаги с вытяжным воздухом, уходящим из теплицы через вытяжной вентиляционный проем 4, кг/с.

Испарение влаги с поверхности почвы 1 при лучистом отоплении можно определить по уравнению массоотдачи, кг/с:

$$G_{исп} = k_{ор} \beta_p (p_{пов} - p_{вн.в}) F_{пов}, \quad (12)$$

где $k_{ор} = F_{пов}^{ор} / F_{пов}$ – коэффициент орошения почвы 1. Может изменяться в пределах от 0 (орошение почвы 1 полностью отсутствует) до 1 (орошается вся поверхность почвы 1 в теплице); $F_{пов}^{ор}$ – площадь орошаемой части поверхности почвы 1, m^2 ; β_p – средний коэффициент массоотдачи поверхности почвы 1, $kg/(m^2 \cdot c \cdot Pa)$; $p_{пов}$ и $p_{вн.в}$ – парциальное давление водяного пара соответственно у поверхности почвы 1 и вдали от нее, Pa .

Потеря влаги с уходящим из теплицы воздухом рассчитывается по следующей формуле, kg/c :

$$G_{вент} = G_v (d_{вн.в} - d_{н.в}), \quad (13)$$

где $d_{вн.в}$ и $d_{н.в}$ – соответственно влагосодержание внутреннего и наружного влажного воздуха, kg/kg .

Уравнение материального баланса деятельной поверхности почвы 1, kg/c :

$$G_{пол} = G_{погл} + G_{исп}, \quad (14)$$

где $G_{пол}$ – расход воды, идущей на полив почвы 1, kg/c ; $G_{погл}$ – расход воды, поглощаемой растениями, kg/c . Если в теплице растения отсутствуют (эмбриональный период их развития), то величина $G_{погл} \approx 0$.

Уравнения материального баланса теплицы (11) и деятельной поверхности почвы 1 (14) также являются обязательным условием при определении температуры $t_{вн.в}$ и относительной влажности $\phi_{вн.в}$ внутреннего воздуха. Как и для системы уравнений теплового баланса (1) и (8), при выборе параметров воздуха $t_{вн.в}$ и $\phi_{вн.в}$ они тоже должны давать правильное решение.

Таким образом, искомые величины $t_{вн.в}$, $\phi_{вн.в}$ и $t_{огр}$ должны быть результатом решения системы уравнений (1), (2), (4), (8), (11) и (14). Если по результатам решения системы данных уравнений относительная влажность внутреннего воздуха окажется равной $\phi_{вн.в} > 100\%$, то ее значение следует принять равным $\phi_{вн.в} = 100\%$ и необходимо произвести перерасчет. Причем влагосодержание $d_{вн.в}$ и энтальпию $h_{вн.в}$ следует искать для пересыщенного влажного воздуха, в котором помимо водяных паров также присутствует капельная влага (влажный насыщенный водяной пар).

Таким образом, разработанная математическая модель лучистого отопления позволяет определить для произвольной теплицы такие важные ее параметры, как требуемая суммарная мощность теплового излучения инфракрасных обогревателей и необходимый расход воды на полив почвы при заданных конкретных условиях. К последним можно отнести температуру наружного воздуха, кратность воздухообмена в помещении, температуру поверхности почвы и т. д. В дальнейшем результатом моделирования тепломассообменных процессов, происходящих в теплице, могут послужить графики, отражающие характер изменения зависимых величин от переменных значений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Модель системы управления комбинированным отоплением теплицы* в условиях закрытого грунта на базе микроконтроллера Raspberry Pi / С.А. Иванов, И.Ю. Квятковская, А.Ф. Дорохов, Н.Д. Шишкин // Вестник АГТУ. – 2015. – № 2. – С. 32–37.
2. *Баканова, С.В.* Воздушное отопление теплиц / С.В. Баканова, А.А. Гарина // Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах : сб. трудов XV Международной научно-практической конференции. – Пенза : АННОО «Приволжский Дом знаний», 2014. – С. 41–43.
3. *Оценка эффективности* системы воздушного отопления в теплице / В.А. Кубис, С.В. Баканова, А.И. Еремкин, Н.А. Орлова // Градостроительство и архитектура. – 2014. – № 2 (15). – С. 94–98.
4. *Usanov, A.Yu.* Construction algorithm of choice resource-saving technologies in vegetable protected ground / A.Yu. Usanov, E.N. Nikitina // Prospect Development of Innovative Economy : Materials of the I International Research and Practice Conference. – Los Gatos (CA), USA : Scientific public organization «Professional science», 2016. – P. 41–46.
5. *Олейниченко, В.Г.* Воздушная система отопления и кондиционирования теплиц с использованием геотермального источника энергии / В.Г. Олейниченко, В.В. Величко // Альтернативная энергетика и экология : международный научный журнал. – 2012. – № 7. – С. 84–87.
6. *Кубис, В.А.* Многофункциональная энергоэффективная теплица для личных подсобных хозяйств / В.А. Кубис, Е.С. Гудашева // Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах : материалы XV Международной научно-практической конференции. – Пенза : АННОО «Приволжский Дом знаний», 2014. – С. 143–148.
7. *NJ greenhouses bloom with radiant heating* // Engineered Systems. – Laguna Hills (CA), USA : Business news publishing company, 1999. – V. 16. – № 1. – P. 32–33.
8. *Шиянова, Н.И.* Инфракрасная система отопления для теплиц / Н.И. Шиянова, П.С. Афанасьев // Импортзамещение в агропромышленном комплексе – основа национальной продовольственной безопасности : материалы Международной научно-практической конференции. – Мелеуз : БИТУ, 2016. – С. 142–147.
9. *Modeling the heat balance of a solar greenhouse with a passive heat accumulator* / A.G. Khalimov, B.E. Khairiddinov, V.D. Kim, G.G. Khalimov // Applied Solar Energy. – New York (NY), USA : Allerton Press, Inc., 2013. – V. 49. – № 4. – P. 211–214.
10. *Болотских, Н.Н.* Инфракрасный обогрев теплиц с помощью электрических длинноволновых нагревательных панелей / Н.Н. Болотских // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – № 9 (140). – С. 43–52.

REFERENCES

1. *Ivanov S.A., Kvyatkovskaya I.Yu., Dorokhov A.F., Shishkin N.D.* Model' sistemy upravleniya kombinirovannym otopleniem teplitsy v usloviyakh zakrytogo grunta na baze mikrokontrollera Raspberry Pi [Model of the system of control of the combined heating of the greenhouse in conditions of the covered area based on the microcontroller Raspberry Pi]. *Vestnik of Astrakhan State Technical University*. 2015. No. 2. Pp. 32–37. (rus)
2. *Bakanova S.V., Garina A.A.* Vozdushnoe otoplenie teplits [Air heating greenhouses]. *Proc. 15th Int. Sci. Conf. 'Problems of Energy Saving in Industrial and Housing Utility Complexes'*. Penza: Privolzhskii Dom znaniy, 2014. Pp. 41–43. (rus)
3. *Kubis V.A., Bakanova S.V., Eremkin A.I., Orlova N.A.* Otsenka effektivnosti sistemy vozduhnogo otopleniya v teplitse [Efficiency estimation of air heating systems in greenhouses]. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura*. 2014. No. 2 (15). Pp. 94–98. (rus)
4. *Usanov A.Yu., Nikitina E.N.* Construction algorithm of choice resource-saving technologies in vegetable protected ground. *Proc. 1st Int. Conf. 'Prospect Development of Innovative Economy'*. Los Gatos, USA, 2016. Pp. 41–46.
5. *Oleinichenko V.G., Velichko V.V.* Vozdushnaya sistema otopleniya i konditsionirovaniya teplits s ispol'zovaniem geotermal'nogo istochnika energii [Air heating system and air-

- conditioning of greenhouses using geothermal energy source]. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal al'ternativnaya energetika i ekologiya*. 2012. No. 7. Pp. 84–87. (rus)
6. Kubis V.A., Gudasheva E.S. Mnogofunktsional'naya energoeffektivnaya teplitsa dlya lichnykh podsobnykh khozyaistv [Multi-energy efficient for greenhouse smallholdings]. *Proc. 15th Int. Sci. Conf. 'Problems of Energy Saving in Industrial and Housing Utility Complexes'*. Penza: Privolzhskii Dom znaniy, 2014. Pp. 143–148. (rus)
 7. *NJ greenhouses bloom with radiant heating. Engineered Systems*. Laguna Hills (CA), USA, 1999. V. 16. No. 1. Pp. 32–33.
 8. Shiyanova N.I., Afanas'ev P.S. Infrakrasnaya sistema otopeniya dlya teplits [Infrared heating system for greenhouses]. *Proc. Int. Sci. Conf. 'Import substitution of Agro-Industrial Complex as a Basis of National Food Security'*. Meleuz: BITU Publ., 2016. Pp. 142–147. (rus)
 9. Khalimov A.G., Khairiddinov B.E., Kim V.D., Khalimov G.G. Modeling the heat balance of a solar greenhouse with a passive heat accumulator. *Applied Solar Energy*. New York, USA, Allerton Press, Inc., 2013. V. 49. No. 4. Pp. 211–214.
 10. Bolotskikh N.N. Infrakrasnyi obogrev teplits s pomoshch'yu elektricheskikh dlinnovolnovykh nagrevatel'nykh panelei [Infrared heating of hothouses provided by electric long-wave heater panels]. *Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit*. 2015. No. 9 (140). Pp. 43–52. (rus)