

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 631.344.8

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-149-161

*М.В. ПАВЛОВ, Д.Ф. КАРПОВ,
Вологодский государственный университет*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ТЕПЛОВУЮ МОЩНОСТЬ ЛУЧИСТО-КОНВЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ ЗИМНЕЙ ТЕПЛИЦЫ

Как показала практика, традиционные системы отопления зимних теплиц (водяные, воздушные) являются малоэффективными с энергетической и экономической точек зрения. В связи с этим особый интерес в сельском хозяйстве представляют инновационные технологии в теплообеспечении культивационных сооружений. Использование геотермальных источников энергии, биотоплива, тепловых насосов и т. п. для обогрева теплиц не всегда оправданно, т. к. целесообразность их применения зависит от месторасположения объекта, факторов окружающей среды и т. д. Поэтому в настоящей работе рассмотрен вариант комбинированного отопления, включающий в себя конвективный обогрев помещения теплицы и поддержание заданного теплового режима почвы с помощью потолочных инфракрасных излучателей.

Цель работы: на основе разработанного метода расчета лучисто-конвективного отопления теплицы исследовать влияние температуры наружного воздуха, теплозащитных качеств ограждения теплицы и поглощательной способности поверхности почвы на расчетную тепловую мощность системы обогрева.

Метод расчета: система взаимосвязанных уравнений теплового и материального балансов теплицы, ее ограждения и поверхности почвы.

Результаты исследований: расчетные зависимости суммарной тепловой мощности, а также отдельно конвективной и лучистой составляющих от температуры наружного воздуха, термического сопротивления ограждения и коэффициента поглощения поверхности почвы.

Практическая значимость: полученные закономерности позволят в дальнейшем оценить эффективность применения лучисто-конвективной системы отопления зимней теплицы для конкретных климатических условий.

Новизна: метод расчета учитывает многократное отражение теплового излучения, идущего от инфракрасного излучателя, влияние массообменных процессов, происходящих в теплице, на потребление тепловой энергии, а также поглощательную способность поверхности почвы.

Ключевые слова: лучисто-конвективное отопление; инфракрасный излучатель; отопительный прибор; почва; теплица.

Для цитирования: Павлов М.В., Карпов Д.Ф. Исследование влияния различных факторов на тепловую мощность лучисто-конвективной системы отопления зимней теплицы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 6. С. 149–161.
DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-149-161

M.V. PAVLOV, D.F. KARPOV,
Vologda State University

INFLUENCE OF VARIOUS FACTORS ON RADIANT AND CONVECTION HEATING OF GREENHOUSE

The traditional heating of greenhouses (based on liquid or air) lacks efficiency, when it concerns energy-saving or economic expenditures. The agricultural industry is therefore interested in the innovative approach to the power supply of greenhouses. The use of geothermal sources, biofuel, heating pumps and other conventional greenhouse heating methods is not always reasonable, as their application depends on location of an object, ecological factors and others. This research investigates a complex heating, when convection heating of the greenhouse territory is maintained by temperature using ceiling infrared radiators.

The aim of the paper is to study the influence of the outdoor air temperature, thermal properties of the perimeter walls and soil surface absorbing capacity on the heating power of a greenhouse within the proposed method of radiant and convection heating.

A system of complex heat- and material-balance equations is used to calculate the greenhouse perimeter walls and the soil surface.

The research results show the dependency of the total heating power when calculated with regard to the outdoor temperature, heat resistance properties of the perimeter walls and the soil surface absorbing capacity.

The results obtained can be used to justify the efficiency of the radiant and convection heating of the greenhouse in specific climatic conditions.

The scientific novelty of the paper is the proposed method of calculating which accounts of multiple heater reflection, the influence of the mass-exchange process inside the greenhouse as well as the absorbing soil properties.

Keywords: radiant and convection heating; infrared emitter; heater; soil; greenhouse.

For citation: Pavlov M.V., Karpov D.F. Issledovanie vliyaniya razlichnykh faktorov na teplovuyu moshchnost' luchisto-konvektivnoi sistemy otopeniya zimnei teplitsy [Influence of various factors on radiant and convection heating of greenhouse]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2019. V. 21. No. 6. Pp. 149–161.
DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-149-161

Введение

Рациональное потребление невозобновляемых топливно-энергетических ресурсов в России и за рубежом касается не только промышленности, жилищно-коммунального сектора, транспорта, энергетики и др., но и сельского хозяйства. В этой приоритетной отрасли экономики любого государства большое количество энергоносителей расходуется на нужды теплообеспечения культивационных сооружений, к которым, прежде всего, относятся зимние теплицы, предназначенные для круглогодичного выращивания растений в закрытом

грунте [1]. Затраты на нужды отопления примерно составляют 30–60 % от общих производственных затрат [2]. Для решения данной проблемы современные теплицы должны [3]:

- иметь оптимальные объемно-планировочные решения (например, зимние теплицы рекомендуется ориентировать коньками в направлении восток-запад, использовать неравные углы наклона кровли и т. п.);
- обладать высокими теплозащитными свойствами;
- максимально использовать солнечную энергию;
- иметь эффективную систему отопления в холодный период года и т. д.

В качестве системы обогрева зимней теплицы на практике используются следующие виды отопления [4]: водяное; воздушное; электрическое; солнечное; биологическое (обогрев корневой системы растений осуществляется за счет разложения органических веществ).

Водяное и воздушное отопление являются традиционными способами обогрева теплиц. К присущим им недостаткам относятся габаритность конструкции, инерционность, значительные утечки воды при транспортировке теплоносителя от источника тепловой энергии до потребителя, избыточные тепловые потери в трубопроводной сети, сложность или невозможность автоматизации системы и т. д. Несмотря на существующие инновационные технологии в теплообеспечении зимних теплиц, к которым можно отнести использование солнечной энергии (гелиотеплицы) [5, 6], тепловых насосов [7, 8], геотермальных источников энергии [9, 10] и др., в данной работе рассмотрен вариант комбинированной системы отопления, включающей в себя конвективный обогрев помещения с помощью отопительных приборов и лучистый – с применением в качестве источников теплоты потолочных инфракрасных излучателей. Такая система отопления экономичнее водяной или воздушной на 30–50 % [11]. За счет применения систем лучистого обогрева без промежуточных теплоносителей появляется реальная возможность увеличить коэффициент использования топлива в 1,5–2 раза. Работа излучателей основана на генерации инфракрасных волн, максимально близких к естественному солнечному обогреву в южных широтах. Они могут быть использованы для выращивания цветов и многолетних растений [12], как, например, в Secog farms (г. Махва, шт. Нью-Джерси, США), овощей и т. п. В случае применения газовых установок лучистого обогрева расходы на содержание, обслуживание и ремонт оборудования невелики. Система газового инфракрасного обогрева также является оптимальной для рассадных отделений теплиц [13].

Отопление зимней теплицы предназначено для формирования необходимого теплового режима. В отличие от жилых и общественных зданий микроклимат в теплице определяется не только температурой и относительной влажностью внутреннего воздуха [14], но и температурой грунта. В таблице в качестве примера представлены требуемые параметры микроклимата в овощных теплицах круглогодичного использования до плодоношения¹.

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

Температурно-влажностный режим теплицы (до плодоношения)

Культура	Температура воздуха, °С			Температура грунта, °С	Относительная влажность воздуха, %
	День		Ночь		
	Солнечно	Пасмурно			
Огурец (зимне-весенний оборот)	22–24	20–22	17–18	20–24	70–75
Огурец (осенний оборот)	25–26	22–23	19–20	22–24	70–75
Томат (зимне-весенний оборот)	22–24	19–20	16–17	18–20	60–65
Томат (осенний оборот)	24–26	18–20	16–18	18–19	60–70
Салат кочанный	20–23	16–18	10	15–16	70–80
Редис	20–22	7–9	5–6	15–16	60–70
Укроп, шпинат	17–18	8–12	5–6	15–16	65–80

Метод расчета

На рис. 1 изображена принципиальная схема лучисто-конвективного отопления зимней теплицы.

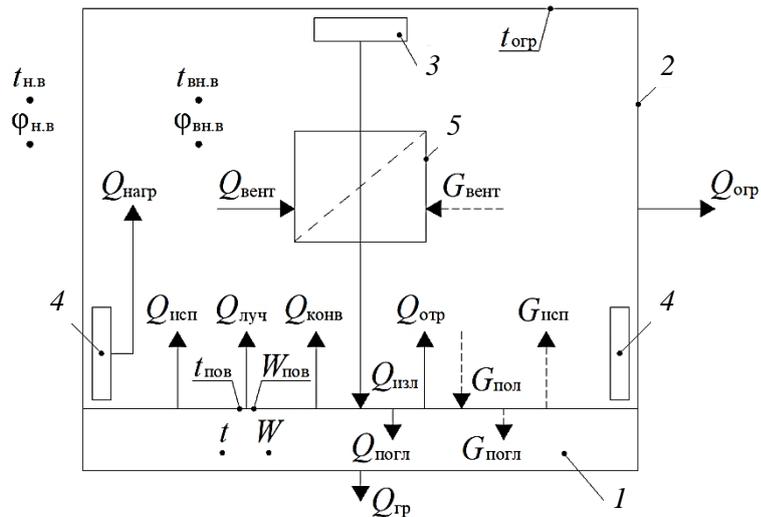


Рис. 1. Расчетная схема лучисто-конвективного отопления теплицы:

1 – почва; 2 – ограждение; 3 – источник инфракрасного излучения (излучатель); 4 – отопительные приборы; 5 – вентиляционный проем (приточный, вытяжной)

Поток теплового излучения $Q_{изл}$, Вт, идущий от излучателя 3, падает на поверхность почвы 1 с температурой $t_{пов}$, °С. Тепловой поток $Q_{погл}$, поглощенный почвой 1, расходуется на конвективный теплообмен с внутренним

воздухом теплицы $Q_{\text{конв}}$, на лучистый теплообмен с внутренней поверхностью ограждения 2 $Q_{\text{луч}}$, имеющей температуру $t_{\text{отр}}$, и на испарение влаги $Q_{\text{исп}}$. Часть теплоты величиной $Q_{\text{гр}}$ уходит безвозвратно в глубинные горизонты грунта. Тепловые потери в теплице также связаны с теплопередачей через ограждение 2 $Q_{\text{отр}}$ и с воздухообменом в помещении $Q_{\text{вент}}$, осуществляемым благодаря работе вентиляторов (условно не показаны) и системе precisely-вытяжных вентиляционных проемов 5. Отраженный от поверхности почвы 1 тепловой поток $Q_{\text{отр}}$ в ходе многократных отражений и самооблучений поглощается ограждением 2 теплицы. С целью поддержания заданного теплового режима в теплице (таблица) часть теплоты величиной $Q_{\text{нагр}}$ внутренний воздух помещения получает от отопительных приборов 4.

При поливе почвы водой в объеме $G_{\text{пол}}$, кг/с, происходит поглощение влаги растениями (листьями и корневой системой, условно не показаны) $G_{\text{погл}}$. Влага расходом $G_{\text{исп}}$, испарившаяся с поверхности почвы 1, уходит из теплицы в количестве $G_{\text{вент}}$ вместе с вытяжным воздухом через вытяжной вентиляционный проем 5. Влаго содержание почвы 1 поддерживается постоянным и равным на ее поверхности $W_{\text{пов}}$, кг/кг.

Температура и относительная влажность воздуха в теплице соответственно равны $t_{\text{вн.в}}$, °С, и $\phi_{\text{вн.в}}$, %, те же параметры для наружного воздуха соответственно составляют $t_{\text{н.в}}$ и $\phi_{\text{н.в}}$.

В соответствии с расчетной схемой (рис. 1) уравнение теплового баланса теплицы можно записать следующим образом:

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

где $Q_{\text{изл}}$ – лучистый тепловой поток, идущий от излучателя 3, Вт; $Q_{\text{нагр}}$ – конвективный тепловой поток, идущий от отопительных приборов 4, Вт; $Q_{\text{отр}}$ – потери теплоты теплопередачей через ограждение 2 теплицы, Вт; $Q_{\text{вент}}$ – потери теплоты с вентиляционным воздухом, уходящим из теплицы через вытяжной вентиляционный проем 5, Вт; $Q_{\text{гр}}$ – потери теплоты в глубинные горизонты грунта, Вт.

Потери теплоты через ограждение 2 теплицы могут быть найдены по уравнению теплопередачи:

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

где $t_{\text{вн.в}}$ – температура внутреннего воздуха, °С; $t_{\text{н.в}}$ – температура наружного воздуха, °С; R_t – сопротивление теплопередаче ограждения 2 теплицы, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; $F_{\text{отр}}$ – суммарная площадь ограждения 2 теплицы, м^2 ; $\beta_{\text{инф}}$ – коэффициент, учитывающий дополнительные затраты тепловой энергии на нагрев инфильтрующегося воздуха, обычно принимается равным 0,2 [15].

Потери теплоты с уходящим вентиляционным воздухом численно равны расходу теплоты на нагрев воздуха, поступающего из окружающей среды в теплицу через приточный вентиляционный проем 5:

$$Q_{\text{вент}} = G_{\text{в}} (h_{\text{вн.в}} - h_{\text{н.в}}), \quad (3)$$

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

Рассмотрим вариант принудительной системы вентиляции теплицы с механическим побуждением за счет работы вентиляторов. В этом случае расход сухой части воздуха будет определяться по формуле

$$G_{\text{в}} = \frac{\rho_{\text{н.в}} n_{\text{в}} F_{\text{пов}}}{60}, \quad (4)$$

где $\rho_{\text{н.в}}$ – плотность сухой части наружного воздуха, кг/м³; $n_{\text{в}}$ – нормативная кратность воздухообмена, м³/ч на 1 м² расчетной площади. Для индивидуальных теплиц кратность воздухообмена должна составлять не менее 1,0 м³/мин на 1 м² площади теплицы; для промышленных теплиц блочного типа – 1,5 м³/мин; для ангарных теплиц – 2,0 м³/мин, по данным [15]; $F_{\text{пов}}$ – площадь поверхности почвы l , м².

Потери теплоты в грунт упрощенно вычисляются по уравнению

$$Q_{\text{гр}} = (t_{\text{вн.в}} - t_{\text{н.в}}) \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i}{R_i} \right), \quad (5)$$

где F_i – расчетная площадь i -й зоны грунта в теплице при их общем количестве n , м²; R_i – сопротивление теплопередаче i -й зоны грунта в теплице при их общем количестве n , м²·К/Вт. Для первой зоны сопротивление теплопередаче равно $R_I = 2,1 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; для второй – $R_{II} = 4,3 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; для третьей – $R_{III} = 8,6 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; для четвертой – $R_{IV} = 14,2 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

Для расчета тепловой мощности системы лучисто-конвективного отопления зимней теплицы, помимо формулы (2), необходимо дополнительное уравнение теплового баланса ограждения 2 теплицы, которое учитывает влияние инфракрасного излучения, идущего от источника теплоты 3:

$$Q_{\text{отр}} = \left(1 - \frac{A_1}{1 - k_{\text{отр}}} \right) Q_{\text{изл}} + Q_{\text{луч}} + Q_{\text{конв2}}, \quad (6)$$

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; A_1 и A_2 – соответственно коэффициенты поглощения поверхности почвы 1 и внутренней поверхности огражде-

ния 2 теплицы; φ_{21} – коэффициент облученности с внутренней поверхности ограждения 2 теплицы на поверхность почвы 1; φ_{22} – коэффициент самооблученности внутренней поверхности ограждения 2 теплицы; $Q_{\text{луч}}$ – результирующее тепловое излучение между поверхностью почвы 1 и внутренней поверхностью ограждения 2 теплицы, Вт; $Q_{\text{конв2}}$ – конвективная составляющая теплообмена между внутренним воздухом и внутренней поверхностью ограждения 2 теплицы, Вт.

Тепловой поток излучением между поверхностью почвы 1 и внутренней поверхностью ограждения 2 теплицы при условии, что $t_{\text{пов}} > t_{\text{огр}}$ и $\varphi_{12} = 1$ (все тепловое излучение, идущее с поверхности почвы 1, полностью попадает на внутреннюю поверхность ограждения 2 теплицы), определяется по формуле

$$Q_{\text{луч}} = c_0 \varepsilon_{\text{пр12}} F_{\text{пов}} \left[\left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{огр}}}{100} \right)^4 \right], \quad (7)$$

где c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $\varepsilon_{\text{пр12}}$ – приведенный относительный коэффициент теплового излучения поверхности почвы 1 и внутренней поверхности ограждения 2 теплицы; $T_{\text{пов}} = t_{\text{пов}} + 273,15$ и $T_{\text{огр}} = t_{\text{огр}} + 273,15$ – 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 Ньютона – Рихмана:

$$Q_{\text{конв2}} = \alpha_{\text{вн}} (t_{\text{вн.в}} - t_{\text{огр}}) F_{\text{огр}}, \quad (8)$$

где $\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждения 2 теплицы, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Уравнение теплового баланса поверхности почвы 1 в теплице (рис. 1) будет иметь вид

$$\frac{A_1 Q_{\text{изл}}}{1 - k_{\text{огр}}} = Q_{\text{луч}} + Q_{\text{конв1}} + Q_{\text{исп}} + Q_{\text{гр}}, \quad (9)$$

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

Конвективный теплообмен между поверхностью почвы 1 и приземным слоем воздуха в теплице определяется также по закону Ньютона – Рихмана:

$$Q_{\text{конв1}} = \alpha_{\text{к}} (t_{\text{пов}} - t_{\text{вн.в}}) F_{\text{пов}}, \quad (10)$$

где $\alpha_{\text{к}}$ – коэффициент теплоотдачи поверхности почвы 1, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Тепловой поток, связанный с процессом парообразования на поверхности почвы I , рассчитывается по уравнению

$$Q_{\text{исп}} = G_{\text{исп}} r, \quad (11)$$

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

Результаты исследований

Рассмотрим на примере промышленной теплицы «Фермер 7.5» (рис. 2) влияние различных факторов на величину тепловой мощности системы лучисто-конвективного отопления культивационного сооружения.

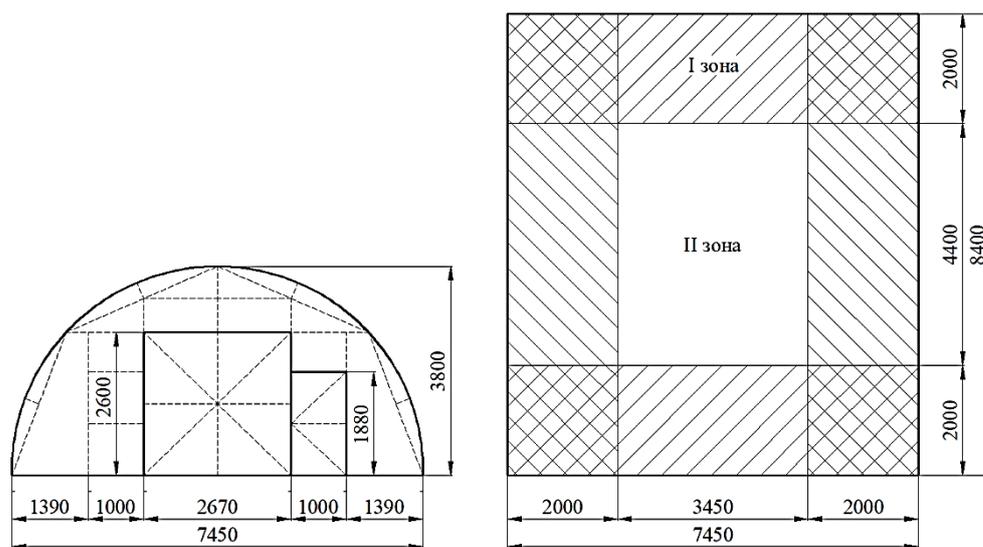


Рис. 2. Промышленная теплица «Фермер 7.5» и схема разбивки грунта на зоны

Исходные данные для выполнения расчета:

1. Размеры (габариты) теплицы: ширина $a = 7,45$ м; длина $b = 8,40$ м; высота $h = 3,80$ м.

2. Параметры поверхности почвы (огурцы до плодоношения в зимне-весенний оборот, согласно данным таблицы): температура $t_{\text{пов}} = 20$ °С; коэффициент поглощения $A_1 = 0,65$ (коэффициент отражения $R_1 = 0,35$); коэффициент теплового излучения (степень черноты) $\varepsilon_1 = A_1 = 0,65$.

3. Параметры ограждения: материал – сотовый поликарбонат с термическим сопротивлением ограждения $R_{\text{орг}} = 0,25$ м² · К/Вт; коэффициент поглощения $A_2 = 0,94$ (коэффициент отражения $R_2 = 0,06$); коэффициент теплового излучения (степень черноты) $\varepsilon_2 = A_2 = 0,94$.

4. Расчетные параметры внутреннего воздуха (таблица): температура $t_{\text{вн.в}} = 22$ °С; относительная влажность $\varphi_{\text{вн.в}} = 70$ %.

5. Расчетные параметры наружного воздуха для условий г. Вологды²: температура $t_{н.в} = -32\text{ }^{\circ}\text{C}$; относительная влажность $\varphi_{н.в} = 85\%$.

6. Параметры вентиляции: принудительная вентиляция с механическим побуждением; кратность воздухообмена $n_b = 1,0\text{ м}^3/\text{мин}$.

7. Параметры орошения: коэффициент орошения почвы $k_{ор} = 1$ (орошается вся поверхность почвы в теплице).

На рис. 3 показана зависимость расчетной тепловой мощности системы лучисто-конвективного отопления зимней теплицы (рис. 2) от температуры наружного воздуха $t_{н.в}$, $^{\circ}\text{C}$, в течение отопительного сезона.

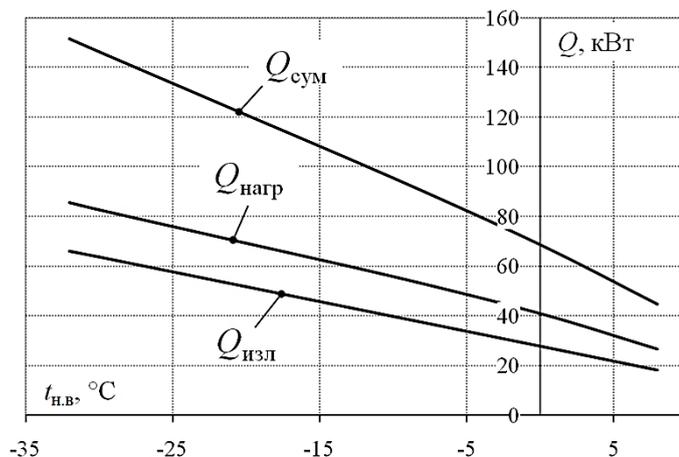


Рис. 3. Тепловая мощность системы отопления вида $Q = Q(t_{н.в})$

Как видно из рис. 3, с повышением температуры наружного воздуха $t_{н.в}$, $^{\circ}\text{C}$, происходит уменьшение суммарной тепловой мощности системы лучисто-конвективного отопления $Q_{сум}$, Вт. Это связано с тем, что с повышением температуры $t_{н.в}$ закономерно уменьшаются тепловые потери теплопередачей через ограждение теплицы $Q_{огр}$ на нужды воздухообмена $Q_{вент}$ и в грунт $Q_{гр}$. В соответствии с уравнением теплового баланса теплицы (1) расчетная тепловая мощность отопительной системы должна быть уменьшена.

Зависимость между расчетной тепловой мощностью системы лучисто-конвективного отопления зимней теплицы и термическим сопротивлением ограждения $R_{огр}$, $\text{м}^2 \cdot \text{K}/\text{Вт}$, представлена на рис. 4.

Термическое сопротивление ограждения $R_{огр}$, $\text{м}^2 \cdot \text{K}/\text{Вт}$, играет важную роль в создании требуемого микроклимата в теплице. Применение сверхтонких светопрозрачных укрывных материалов в холодный период года, особенно для северных регионов страны с суровым климатом, нецелесообразно. Ограждение

²СП 131.13330.2012. Строительная климатология.

теплицы является одной из главных проблем в строительстве культивационных сооружений с точки зрения энергосбережения, т. к. оно должно одновременно эффективно пропускать солнечный свет (иметь высокий коэффициент светопропускания) и выполнять свои теплозащитные функции. Даже современные материалы, такие как сотовый поликарбонат с закрытой ячеистой структурой (сотами), обладают сравнительно невысокими теплоизоляционными качествами (например, при значительной толщине листа сотового поликарбоната $\delta = 32$ мм значение $R_{огр}$ не превышает $0,83 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$). В соответствии с рис. 4 увеличение термического сопротивления $R_{огр}$ ведет к снижению расчетной тепловой мощности системы отопления. Стоит отметить, что суммарный тепловой поток $Q_{сум}$, Вт, уменьшается не так интенсивно, как ожидалось. Это связано с тем, что при расчетной температуре наружного воздуха $t_{н.в} = -32$ °С основная часть теплоты расходуется на нужды вентиляции с целью организации необходимого воздухообмена в помещении. Кроме того, происходит постепенное перераспределение тепловой нагрузки на отопление: для получения суммарной тепловой мощности $Q_{сум}$ при снижении лучистой составляющей $Q_{изл}$ наблюдается заметный рост $Q_{нагр}$.

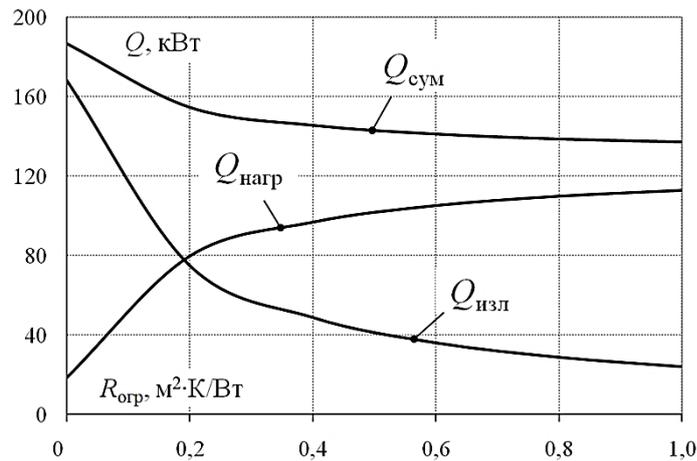


Рис. 4. Тепловая мощность системы отопления вида $Q = Q(R_{огр})$

Влияние на тепловой и материальный балансы почвы, а значит, и теплицы в целом при отоплении оказывает способность поверхности почвы поглощать (или отражать) тепловую энергию. На рис. 5 показана зависимость тепловой мощности системы лучисто-конвективного отопления зимней теплицы от коэффициента поглощения поверхности почвы A , %.

Суммарная тепловая мощность системы лучисто-конвективного отопления зимней теплицы не зависит от поглощательной способности поверхности почвы. Как известно, отопление предназначено для компенсации тепловых потерь в окружающую среду с целью поддержания заданного микроклимата в помещении (таблица).

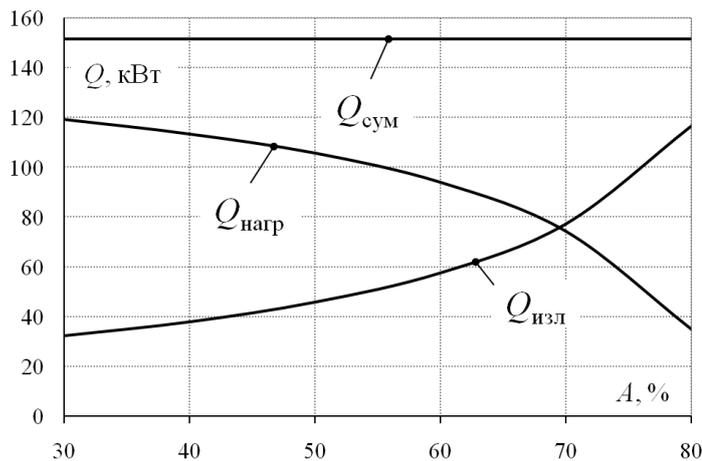


Рис. 5. Тепловая мощность системы отопления вида $Q = Q(A)$

Тепловые потоки $Q_{огр}$, Вт, $Q_{вент}$ и $Q_{гр}$ не зависят от коэффициента поглощения A , %, и их значения в данном случае остаются постоянными. Тогда в соответствии с уравнением (1) расчетная тепловая мощность должна быть также неизменной величиной. С целью поддержания требуемой температуры внутреннего воздуха и грунта тепловая мощность $Q_{изл}$, согласно формуле (6), должна увеличиваться при росте коэффициента поглощения A . При постоянной суммарной тепловой мощности системы отопления $Q_{сум}$ увеличение лучистой составляющей $Q_{изл}$ закономерно ведет к уменьшению тепловой мощности конвективного обогрева помещения $Q_{нагр}$.

Заключение

Полученные закономерности изменения расчетной тепловой мощности системы лучисто-конвективного отопления зимней теплицы от ряда ключевых факторов позволяют оценить целесообразность применения данного способа обогрева для конкретно заданных климатических условий. Кроме того, на основе построенных зависимостей возможно создание инженерной методики расчета комбинированной системы отопления, т. к. программный расчет требует определенного количества времени и соответствующего уровня квалификации специалиста. Данная методика может включать в себя график для нахождения базовой величины тепловой мощности системы отопления, а также ряд вспомогательных закономерностей с целью определения корректирующих (поправочных) коэффициентов, учитывающих различного рода факторы. Также имеет смысл выполнить оценку энергетической и, как вариант, экономической эффективности применения комбинированной (лучисто-конвективной) системы отопления зимней теплицы в сравнении с традиционным (конвективным) обогревом культивационного сооружения. В рассматриваемом случае целесообразным будет использование в качестве источников теплоты газовых инфракрасных излучателей темного типа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Hanan J.J.* Greenhouses: advanced technology for protected horticulture. Colorado: CRC Press, 2017. 684 p.
2. *Липатов А.В., Спиридонова Е.В., Фролов А.Ф.* Повышение эффективности систем отопления теплиц // Инновационные технологии в строительстве, теплогазоснабжении и энергообеспечении : материалы V Международной научно-практической конференции. – Саратов, 2017. С. 108–112.
3. *Кубис В.А., Баканова С.В., Еремкин А.И., Орлова Н.А.* Оценка эффективности системы воздушного отопления в теплице // Градостроительство и архитектура. 2014. № 2 (15). С. 94–98.
4. *Ляшенко Т.А., Черемисина С.А.* Исследование энергоэффективности системы отопления в теплицах для условий Амурской области // Тенденции развития науки и образования. 2018. № 35. С. 13–17.
5. *Романова М.И., Шерстюков В.В.* Энергоэффективный метод использования излишек тепла солнечного коллектора // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4 (23). С. 84.
6. *Pieters J.G., Deltour J.M.* Modelling solar energy input in greenhouses // Solar Energy. 1999. V. 67. № 1–3. P. 119–130.
7. *Мешков Р.Е., Сатышев А.В.* Применение тепловых насосов в отоплении теплиц // Молодежный вектор развития аграрной науки. 2018. С. 129–133.
8. *Шаталов И.К., Шаталова И.И.* Оценка эффективности применения инновационных технологий для энергообеспечения тепличного комплекса // Вестник Российского университета дружбы народов. 2017. Т. 18. № 2. С. 275–285.
9. *Таймасханов, Х.Э., Заурбеков Ш.Ш., Минцаев М.Ш., Якубов Т.В., Барзаева М.А.* Экономическая целесообразность использования геотермальной энергии для отопления теплиц // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. 2017. С. 167–172.
10. *Mihalakakou G., Psiloglou B., Santamouris M., Nomidis D.* Application of renewable energy sources in the Greek islands of the south Aegean Sea // Renewable Energy. 2002. V. 26. № 1. P. 1–19.
11. *Беляева Е.А., Хальметов А.А.* Система работы инфракрасного отопления с помощью пленочных электронагревателей // Инновации природообустройства и защиты окружающей среды. 2019. С. 18–21.
12. *NJ greenhouses bloom with radiant heating* // Engineered Systems. 1999. V. 16. № 1. P. 32–33.
13. *Ловкис В.Б., Деменок Н.А.* Энергосберегающие технологии инфракрасного обогрева // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве. 2014. С. 66–71.
14. *Paulauskaite S., Parfentjeva N., Valancius K.* Results of the investigation of microclimate created by radiant heating/cooling system // 7th International conference on environmental engineering. 2008. P. 859–863.
15. *Климов В.В.* Оборудование теплиц для подсобных и личных хозяйств. Москва : Энергоатомиздат, 1992. 96 с.

REFERENCES

1. *Hanan J.J.* Greenhouses: advanced technology for protected horticulture. Colorado: CRC Press, 2017. 684 p.
2. *Lipatov A.V., Spiridonova E.V., Frolov A.F.* Povyshenie effektivnosti sistem otopleniya teplic [Increase of heating efficiency of greenhouses]. *Innovacionnye tekhnologii v stroitel'stve, teplogazosnabzhenii i energoobespechenii*. 2017. Pp. 108–112. (rus)
3. *Kubis V.A., Bakanova S.V., Eremkin A.I., Orlova N.A.* Ocenka effektivnosti sistemy vozdušnogo otopleniya v teplice [Evaluation of air heating efficiency of greenhouses]. *Gradostroitel'stvo i arhitektura*. 2014. No. 2 (15). Pp. 94–98. (rus)
4. *Lyashenko T.A., Cheremisina S.A.* Issledovanie energoeffektivnosti sistemy otopleniya v teplicah dlya uslovij Amurskoj oblasti [Energy efficiency of greenhouse heating in the Amur region]. *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2018. No. 35. Pp. 13–17. (rus)

5. Romanova M.I., Sherstyukov V.V. Energoeffektivnyj metod ispol'zovaniya izlishek tepla solnechnogo kollektora [Energy-efficient method of using excess heat of solar collector]. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2012. No. 4 (23). P. 84. (rus)
6. Pieters J.G., Deltour J.M. Modelling solar energy input in greenhouses. *Solar Energy*. 1999. V. 67. No. 1-3. Pp. 119–130.
7. Meshkov R.E., Satyshev A.V. Primenenie teplovyh nasosov v otoplenii teplic [Application of heat pumps in heating of greenhouses]. In: Molodezhnyj vektor razvitiya agrarnoj nauki. 2018. Pp. 129–133. (rus)
8. Shatalov I.K., Shatalova I.I. Ocenka effektivnosti primeneniya innovacionnyh tekhnologij dlya energoobespecheniya teplichnogo komplekse [Innovative technologies in energy supply of greenhouses]. *Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov*. 2017. V. 18. No. 2. Pp. 275–285. (rus)
9. Tajmaskhanov H.E., Zaurbekov Sh.Sh., Mincaev M.Sh., Yakubov T.V., Barzaeva M.A. Ekonomicheskaya celesoobraznost' ispol'zovaniya geotermal'noj energii dlya otopleniya teplic [Feasibility of using geothermal heating energy]. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: problemy i rezul'taty*. 2017. Pp. 167–172. (rus)
10. Mihalakakou G., Psiloglou B., Santamouris M., Nomidis D. Application of renewable energy sources in the Greek islands of the south Aegean Sea. *Renewable Energy*. 2002. V. 26. No. 1. Pp. 1–19.
11. Belyaeva E.A., Hal'metov A.A. Sistema raboty infrakrasnogo otopleniya s pomoshch'yu plenochnyh elektronagrevatelej [Infrared heating operation using film electric heaters]. *Innovacii prirodobustrojstva i zashchity okruzhayushchej sredy*. 2019. Pp. 18–21. (rus)
12. NJ greenhouses bloom with radiant heating. *Engineered Systems*. 1999. V. 16. No. 1. Pp. 32–33.
13. Lovkis V.B., Demenok N.A. Energosberegayushchie tekhnologii infrakrasnogo obogreva [Energy-saving technologies of infrared heating]. *Nauchno-tehnicheskij progress v sel'skohozyajstvennom proizvodstve*. 2014. Pp. 66–71. (rus)
14. Paulauskaite S., Parfentjeva N., Valancius K. Results of the investigation of microclimate created by radiant heating/cooling system. *Proc. Int. Conf. 7th on Environmental Engineering*. 2008. Pp. 859–863.
15. Klimov V.V. Oborudovanie teplic dlya podsobnyh i lichnyh hozyajstv [Greenhouse equipment for subsidiary and personal farms]. Moscow: Energoatomizdat, 1992. 96 p. (rus)

Сведения об авторах

Павлов Михаил Васильевич, канд. техн. наук, доцент, Вологодский государственный университет, 160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, pavlov_kaftgv@mail.ru

Карпов Денис Федорович, старший преподаватель, Вологодский государственный университет, 160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, karpov_denis_85@mail.ru

Authors Details

Mihail V. Pavlov, PhD, A/Professor, Vologda State University, 15, Lenin Str., 160000, Vologda, Russia, pavlov_kaftgv@mail.ru

Denis F. Karpov, Senior Lecturer, Vologda State University, 15, Lenin Str., 160000, Vologda, Russia, karpov_denis_85@mail.ru