

DOI: 10.34031/2071-7318-2019-4-12-47-55

Павлов М.В., Карнов Д.Ф.Вологодский государственный университет**Россия, 160000, Вологда, ул. Ленина, д. 15***E-mail: pavlov_kaftgv@mail.ru*

СПОСОБ РАСЧЕТА КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ КУЛЬТИВАЦИОННОГО СООРУЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЗИМНЕЙ ТЕПЛИЦЫ

Аннотация. *Современные системы искусственного обогрева культивационных сооружений на примере зимних теплиц, предназначенных для круглогодичного использования, требуют разработки достаточно точных и надежных методов расчета. Децентрализованная система теплоснабжения сельскохозяйственных сооружений, включающая в себя исключительно потолочные инфракрасные излучатели, как показали проведенные расчеты, себя оправдывает только в умеренно холодный период года. При более низких температурах наружного воздуха, характерных в основном для января, ввиду специфики лучистого отопления, температура внутри помещения может опускаться ниже нормативных значений. Поэтому в статье рассмотрен способ определения тепловой мощности лучисто-конвективной системы отопления, включающей в себя инфракрасные излучатели для обогрева почвы и конвективные отопительные приборы, необходимые для поддержания заданной температуры воздуха в помещении. Методика расчета лучисто-конвективной (комбинированной) системы отопления сводится к определению тепловых и массовых потоков, поступающих и уходящих из теплицы в окружающую среду, а также к нахождению неизвестных параметров микроклимата (в первую очередь, температуры внутреннего воздуха), формирующих заданный тепловлажностный режим агротехнологического сооружения. На примере промышленной теплицы «Фермер 7.5» выполнена апробация предложенного способа расчета.*

Ключевые слова: *лучисто-конвективное отопление, комбинированное отопление, инфракрасный излучатель, тепловая мощность, отопительный прибор, почва, теплица.*

Введение. Формирование условий для социально-экономической стабильности в обществе предполагает необходимость формирования достаточных объемов и рациональной структуры продовольственных ресурсов. Важная роль в решении этой задачи принадлежит круглогодичному обеспечению населения высококачественной и разнообразной овощной продукцией [1–3].

В настоящее время в сельском хозяйстве активно ведется строительство новых и эксплуатация существующих теплиц в модульном (индивидуальном) и блочном исполнениях [4]. Решением проблемы выращивания рассады и овощей в защищенном грунте является проектирование не только оптимальной конструкции зимней теплицы, но и системы отопления, которая бы обеспечивала комфортные условия для растений при резких колебаниях температуры наружного воздуха в ночное и дневное время холодного периода года [5].

Современные тенденции тепличного строительства направлены на децентрализацию теплоснабжения зимних теплиц, т. е. на обогрев помещений без каких-либо промежуточных теплоносителей. Данное техническое решение позволяет увеличить коэффициент использования топлива примерно в 1,5–2,0 раза в сравнении с традици-

онными системами отопления [6]. При этом использование солнечной энергии (гелиотеплицы) [7, 8], тепловых насосов [9, 10] и геотермальных источников энергии [11] для обогрева зимних теплиц по ряду причин, к которым можно отнести, в первую очередь, зависимость производства теплоты от географических и климатических условий местности, является во многих случаях нецелесообразным вариантом.

Высокая стоимость энергоресурсов, которая порой приводит к нерентабельности всего тепличного производства, заставляет руководителей предприятий переходить на энергоэффективные технологии обогрева, например, с использованием в качестве источников теплоты длинноволновых инфракрасных излучателей, работающих в основном на газообразном топливе [12]. Это позволяет одновременно создать условия «солнечного» отопления в теплице при минимальных энергозатратах и использовать продукты сгорания газообразного топлива (CO₂) для питания растений. Однако, как показали проведенные исследования, применение исключительно инфракрасного обогрева почвы не позволяет, особенно в зимний период года, поддерживать в теплице оптимальную (или допустимую) температуру внутреннего воздуха, согласно данным табл. 1 [13].

Таблица 1

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

Поэтому имеет смысл рассмотреть вариант комбинированного отопления зимней теплицы, когда тепловой режим почвы формируется за счет потолочных инфракрасных излучателей, а подогрев внутреннего воздуха до требуемых значений (табл. 1) осуществляется с помощью автономных конвективных обогревателей (например, электрокалориферных установок). Здесь стоит оговориться, что режим их работы неравномерный в течение отопительного сезона (зависит от температуры наружного воздуха) и возможно полное отключение конвективных обогревателей в осенний и весенний периоды года, когда система лучистого отопления справляется самостоятельно.

Если коснуться существующих методик расчета лучистого отопления зимних теплиц, то они не лишены недостатков. Так, например, в работе [12] совершенно не рассматриваются процессы массопереноса, происходящие в теплице с инфракрасными излучателями, которые напрямую влияют на тепловлажностный режим культивационного сооружения. Кроме того, не учтена специфика самого инфракрасного излучения, связанная, например, с многократностью отражений лучистого потока теплоты от поверхностей теплообмена. Также не стоит забывать, что поддержание требуемых температурных условий почвы при инфракрасном обогреве вовсе не дает гарантий соблюдения климатических условий в самом помещении в соответствии с табл. 1, так как температура внутреннего воздуха является зависимой величиной. То же самое относится и к методике расчета, представленной в научной статье [3], где акцентировано внимание не на самом отоплении зимней теплицы, а на теплообмене излучением между источником теплоты и окружающими объектами (в первую очередь, полом). В публикации [14] уделено внимание только температуре воздуха в помещении при работе инфракрасных излучателей. Таким образом, остается актуальной проблема разработки метода расчета

децентрализованной лучисто-конвективной системы отопления, обеспечивающей требуемые параметры микроклимата (табл. 1) в течение всего календарного года.

Алгоритм расчета лучисто-конвективного (комбинированного) отопления зимней теплицы. Одним из вариантов решения обозначенной проблемы, в первую очередь, для эксплуатируемых зимних теплиц, является установка потолочных инфракрасных излучателей при существующей водяной системе отопления (для новых теплиц, очевидно, имеет смысл применение автономных конвективных обогревателей), что позволит уменьшить тепловую нагрузку традиционной системы теплообеспечения. Сущность метода расчета лучисто-конвективного (комбинированного) отопления заключается в определении всех тепловых и массовых потоков, поступающих и уходящих из теплицы в окружающую среду, и нахождении неизвестных параметров микроклимата, формирующих тепловлажностный режим культивационного сооружения (табл. 1).

На рис. 1 представлена расчетная схема лучисто-конвективного отопления зимней теплицы.

Тепловлажностный режим зимней теплицы (рис. 1), согласно табл. 1, определяется температурой $t_{\text{вн.в}}, ^\circ\text{C}$, и относительной влажностью $\varphi_{\text{вн.в}}, \%$, внутреннего воздуха, а также температурой поверхности почвы 1, равной $t_{\text{пов}}, ^\circ\text{C}$. Влажностное содержание поверхности почвы 1 имеет постоянное значение $W_{\text{пов}}, \text{кг/кг}$. Температура и относительная влажность наружного воздуха также известны и соответственно составляют $t_{\text{н.в}}, ^\circ\text{C}$, и $\varphi_{\text{н.в}}, \%$. Температура внутренней поверхности ограждения 2 теплицы $t_{\text{огр}}, ^\circ\text{C}$, неизвестна и находится через решение системы уравнений теплового баланса относительно рассматриваемой поверхности.

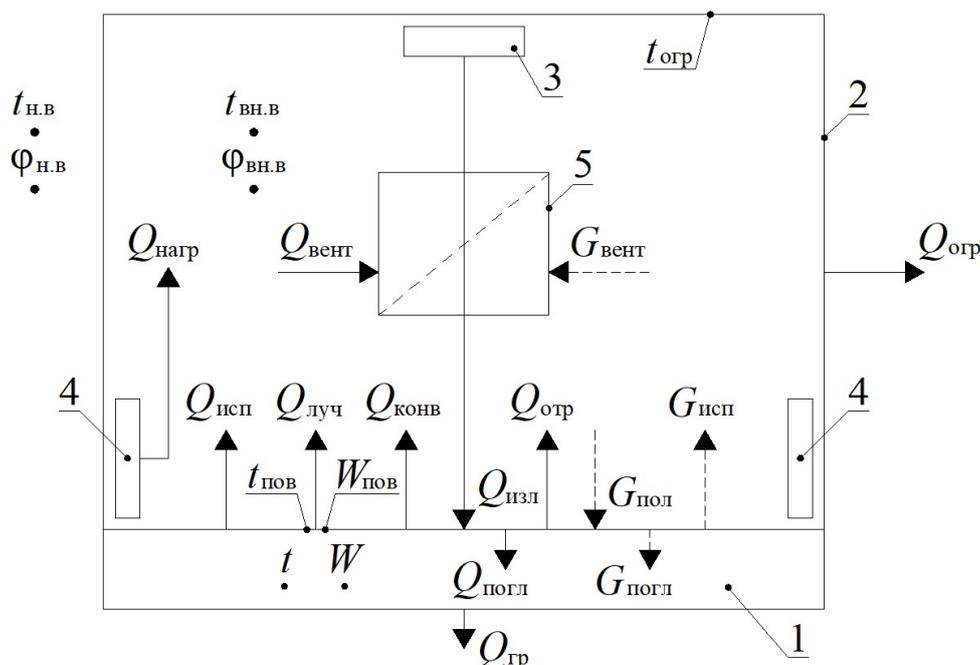


Рис. 1. Расчетная схема лучисто-конвективного отопления теплицы:

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

Количество теплоты, поступающей в единицу времени на внутреннюю поверхность ограждения 2 зимней теплицы, равно:

$$Q_{отр} = (1 - (A_1/(1 - k_{отр})))Q_{изл} + Q_{луч} + Q_{конв2}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где $k_{отр} = (1 - A_1)(1 - A_2)\varphi_{21}/(1 - \varphi_{22}(1 - A_2))$ – 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 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 теплицы; $Q_{изл}$ – лучистая составляющая тепловой мощности комбинированной системы отопления, Вт; $Q_{луч}$ – результирующее тепловое излучение, возникающее между поверхностью почвы 1 и внутренней поверхностью ограждения 2 теплицы, Вт; $Q_{конв2}$ – конвективная составляющая теплообмена между внутренним воздухом и внутренней поверхностью ограждения 2 теплицы, Вт.

Лучистая составляющая тепловой мощности комбинированной системы отопления, согласно действующему своду правил [15], не должна превышать максимальной величины (полагаем, что все инфракрасное излучение, испускаемое излучателем 3, падает на поверхность почвы 1 теплицы), равной:

$$Q_{изл} = q_{изл}F_{пов}, \text{ Вт}, \quad (2)$$

где $q_{изл}$ – максимальная интенсивность инфракрасного излучения, Вт/м². В соответствии со сводом правил [15] величина $q_{изл}$ не должна превышать 150 Вт/м² на постоянных и 250 Вт/м² на непостоянных рабочих местах; $F_{пов}$ – площадь поверхности почвы 2 теплицы, м².

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

$$Q_{луч} = c_0 \varepsilon_{пр12} F_{пов} ((T_{пов}/100)^4 - (T_{отр}/100)^4), \text{ Вт}, \quad (3)$$

где c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, 5,67 Вт/(м²·К⁴); $\varepsilon_{пр12}$ – приведенный относительный коэффициент теплового излучения поверхности почвы 1 и внутренней поверхности ограждения 2 теплицы; $T_{пов} = t_{пов} + 273,15$ и $T_{отр} = t_{отр} + 273,15$ – 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 Ньютона-Рихмана:

$$Q_{конв2} = \alpha_{вн}(t_{вн.в} - t_{отр})F_{отр}, \text{ Вт}, \quad (4)$$

где $\alpha_{вн}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждения 2 теплицы, Вт/(м²·К);

$F_{огр}$ – суммарная площадь ограждения 2 теплицы, m^2 .

В то же время тепловой поток, уходящий через ограждение 2 теплицы, по уравнению теплопередачи будет равен:

$$Q_{огр} = ((t_{огр} - t_{н.в.})/R_t)F_{огр}, \text{ Вт}, \quad (5)$$

где $R_t = R_{огр} + 1/\alpha_n$ – сопротивление теплопередаче ограждения 2 теплицы, $m^2 \cdot K/Вт$; $R_{огр}$ – термическое сопротивление ограждения 2 теплицы, $m^2 \cdot K/Вт$; α_n – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждения 2, $Вт/(m^2 \cdot K)$. По данным таблицы 6 свода правил [16] $\alpha_n = 23 \text{ Вт}/(m^2 \cdot K)$.

Конвективная составляющая тепловой мощности комбинированной системы отопления находится через уравнение теплового баланса зимней теплицы:

$$Q_{изл} + Q_{нагр} = Q_{огр} + Q_{вент} + Q_{гр}, \text{ Вт}, \quad (6)$$

где $Q_{нагр}$ – конвективный тепловой поток, идущий от автономных конвективных обогревателей 4, Вт; $Q_{вент}$ – потери теплоты с вентиляционным воздухом, уходящим из теплицы через вытяжной вентиляционный проем 5, Вт; $Q_{гр}$ – потери теплоты в глубинные горизонты грунта, Вт.

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

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

где G_B – 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, $Дж/кг$.

Потери теплоты в грунт упрощенно вычисляются по уравнению:

$$Q_{гр} = (t_{вн.в} - t_{н.в.})\sum_{i=1}^n (F_i/R_i), \text{ Вт}, \quad (8)$$

где F_i – расчетная площадь i -ой зоны грунта в теплице при их общем количестве n , m^2 ; R_i – сопротивление теплопередаче i -ой зоны грунта в теплице при их общем количестве n , $m^2 \cdot K/Вт$. Для первой зоны сопротивление теплопередаче равно $R_I = 2,1 \text{ м}^2 \cdot K/Вт$; для второй – $R_{II} = 4,3 \text{ м}^2 \cdot K/Вт$; для третьей – $R_{III} = 8,6 \text{ м}^2 \cdot K/Вт$; для четвертой – $R_{IV} = 14,2 \text{ м}^2 \cdot K/Вт$ [17].

Уравнение теплового баланса поверхности почвы 1 связывает между собой тепловые и массообменные процессы, происходящие в теплице:

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

где $Q_{конв1}$ – тепловой поток, вызванный конвективным теплообменом между поверхностью почвы 1 и приземным слоем воздуха в теплице (на рис. 1 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 также подчиняется закону Ньютона-Рихмана:

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

где α_k – коэффициент теплоотдачи поверхности почвы 1, $Вт/(m^2 \cdot K)$.

Тепловой поток, связанный с процессом парообразования на поверхности почвы 1, рассчитывается по уравнению:

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

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

При стационарном тепловлажностном режиме в зимней теплице интенсивность испарения влаги с поверхности почвы 1 должна быть равна количеству воды, уходящему из теплицы вместе с вентиляционным воздухом, т. е.:

$$G_{исп} = G_{вент} = G_B(d_{вн.в} - d_{н.в.}), \text{ кг/с}, \quad (12)$$

где $G_{вент}$ – потери влаги с уходящим из теплицы воздухом, $кг/с$; $d_{вн.в}$ и $d_{н.в.}$ – соответственно влажностное содержание внутреннего и наружного влажного воздуха, $кг/кг$.

Если на данном этапе расчета не учитывать количество влаги, поглощаемое растениями в теплице, то расход воды на полив почвы будет равен:

$$G_{пол} = G_{исп}, \text{ кг/с}, \quad (13)$$

где $G_{пол}$ – расход воды на полив почвы, $кг/ч$.

Стоит отметить, что при разработке метода расчета комбинированной системы отопления зимней теплицы, принято во внимание ряд допущений: во-первых, расчет теплообмена через ограждение культивационного сооружения по уравнению теплопередачи (5) выполняется как для плоской стенки, ввиду относительно малой толщины конструкции, обычно не превышающей 32 мм; во-вторых, потолочные инфракрасные излучатели рассматриваются как линейные источники теплоты, и поэтому затенения ими ограждающих конструкций теплицы не учитываются.

Пример реализации способа. Рассмотрим на примере индивидуальной промышленной теплицы «Фермер 7.5» (рис. 2) способ расчета комбинированной системы отопления.

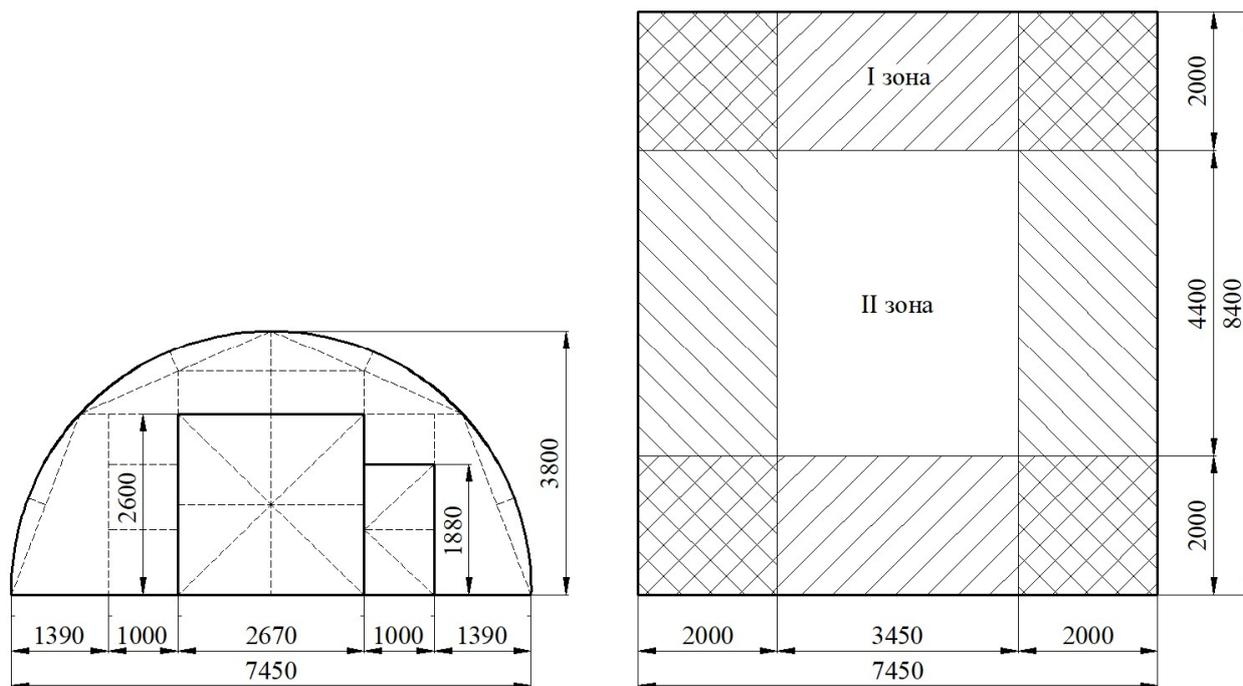


Рис. 2. Промышленная теплица «Фермер 7.5» и схема разбивки грунта на зоны

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 (томаты до плодоношения в зимне-весенний оборот, согласно данным табл. 1): температура $t_{\text{пов}} = 18$ °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 $R_{\text{огр}} = 0,25$ 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 (табл. 1): температура $t_{\text{вн.в}} = 22$ °С; относительная влажность $\varphi_{\text{вн.в}} = 65\%$.

5. Расчетные параметры наружного воздуха для условий г. Вологды [18]: температура $t_{\text{н.в}} = -32$ °С; относительная влажность $\varphi_{\text{н.в}} = 85\%$.

6. Параметры воздухообмена: принудительная вентиляция; кратность воздухообмена для индивидуальной теплицы – $n_v = 1,0$ м³/мин на 1 м² площади помещения [19].

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

8. Условие пребывания людей в рабочей зоне: непостоянное пребывание рабочего персонала на своих местах.

Расчет лучисто-конвективного отопления промышленной теплицы «Фермер 7.5» (рис. 2)

выполнен в математическом редакторе «Mathcad».

По итогам программного расчета лучисто-конвективного отопления промышленной теплицы «Фермер 7.5» получены следующие результаты:

1. Требуемая мощность инфракрасного излучения $Q_{\text{изл}} \approx 15,6$ кВт и конвективной системы отопления $Q_{\text{нагр}} \approx 133,7$ кВт.

2. Необходимый расход воды на полив почвы $G_{\text{пол}} \approx 58,5$ кг/ч.

3. Потери теплоты: через ограждение теплицы $Q_{\text{огр}} \approx 23,4$ кВт; с вентиляционным воздухом, уходящим из теплицы в окружающую среду, $Q_{\text{вент}} \approx 124,2$ кВт; в грунт $Q_{\text{гр}} \approx 1,82$ кВт.

4. Температура внутренней поверхности ограждения теплицы $t_{\text{огр}} \approx 8,8$ °С.

5. Потери теплоты от теплообмена излучением между поверхностью почвы и внутренней поверхностью ограждения теплицы $Q_{\text{луч}} \approx 1,96$ кВт.

6. Потери теплоты от конвективного теплообмена между внутренним воздухом и поверхностью почвы в теплице $Q_{\text{конв1}} \approx 0,08$ кВт (в данном случае $t_{\text{вн.в}} > t_{\text{пов}}$ °С); между внутренним воздухом и внутренней поверхностью ограждения теплицы $Q_{\text{конв2}} \approx 16,1$ кВт.

7. Потери теплоты, связанные с процессом испарения влаги с поверхности почвы в теплице, составили $Q_{\text{исп}} \approx 40,0$ кВт.

На рис. 3 показана зависимость расчетной тепловой мощности системы лучисто-конвективного отопления $Q_{\text{сум}} = Q_{\text{изл}} + Q_{\text{нагр}}$, Вт, и температуры внутренней поверхности ограждения

, °С, зимней теплицы (рис. 2) от температуры наружного воздуха $t_{н.в.}$, °С, в течение отопительного сезона. Температура внутренней поверхно-

сти ограждения $t_{огр}$ определяется исходя из решения системы взаимосвязанных уравнений тепломассопереноса (1), (5), (6), (9), (12) и (13).

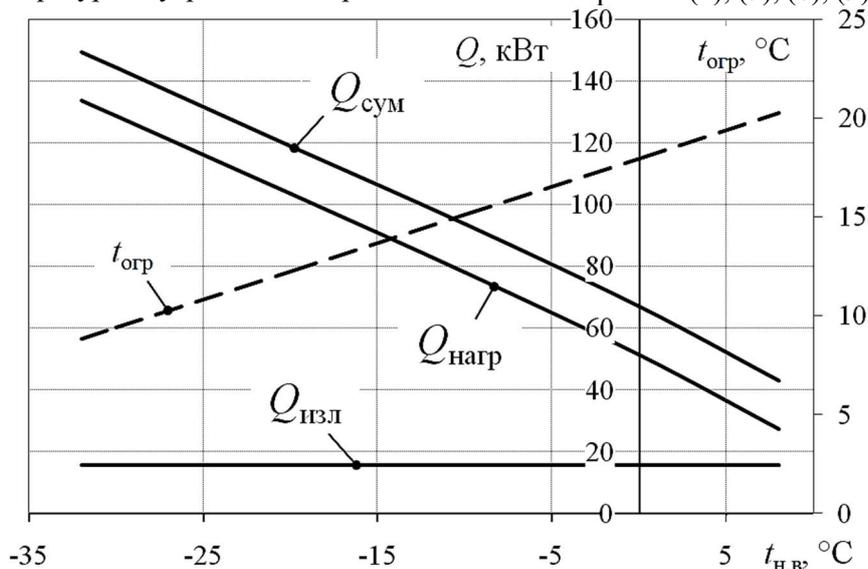


Рис. 3. Тепловая мощность системы отопления и температура ограждения теплицы

Согласно рис. 3, с повышением температуры наружного воздуха $t_{н.в.}$, °С, наблюдается уменьшение суммарной тепловой мощности комбинированной системы отопления $Q_{сум}$, Вт, что является вполне закономерным. Отопление служит для компенсации тепловых потерь в помещении, которые снижаются при росте температуры окружающей среды [20–23]. Ввиду того, что ограждение теплицы не обладает высокими теплозащитными свойствами (данная проблема является одной из ключевых в тепличном строительстве) температура $t_{огр}$, °С, в определенных случаях может опускаться ниже 10 °С. Поэтому стоит рассмотреть вариант предварительного нагрева наружного воздуха для нужд вентиляции теплицы в случае неблагоприятных климатических условий.

Результаты исследования. Конвективная составляющая тепловой мощности комбинированной системы отопления теплицы оказалась гораздо больше лучистой. Это объясняется не только низкой температурой наружного воздуха $t_{н.в.}$, °С, но и ограничениями по интенсивности инфракрасного излучения. С ростом температуры наружного воздуха доля лучистого отопления в тепловом балансе комбинированного отопления, очевидно, будет неуклонно увеличиваться. В любом случае рассмотренный способ обогрева позволяет поддерживать как требуемую температуру почвы, так и температуру внутреннего воздуха в зимней теплице без подключения к системе централизованного теплоснабжения (СЦТ). Как показали расчеты, расход теплоты на нужды воздухообмена оказался достаточно большим, поэтому имеет смысл рассмотреть также

вариант предварительного подогрева приточного воздуха до расчетной температуры перед его подачей в теплицу.

Заключение и выводы. Предложенный способ расчета может быть использован для проектирования комбинированных систем отопления культивационных сооружений, включающих как конвективные отопительные приборы, так и инфракрасно-лучистые обогреватели.

Перспективой дальнейших исследований является разработка инженерной методики расчета системы лучисто-конвективного отопления теплицы культивационного сооружения, которая позволит проектировщику в максимально сжатые сроки и по предельно упрощенному алгоритму, без решения сложной системы взаимосвязанных уравнений теплового и материального балансов, определять искомые характеристики при заданных расчетных условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карпов Д.Ф., Синицын А.А. Технико-экономическая оценка эффективности применения лучистого отопления в теплицах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 1. С. 73–80. DOI: 10.12737/article_5c50621316e4b5.61522261.
2. 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.
3. Ловкис В.Б., Деменок Н.А., Ловкис О.В., Мартинов О.Г. Современный подход к отоплению теплиц // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2012. С. 334–342.

4. Hanan J.J. Greenhouses: advanced technology for protected horticulture. Colorado: CRC Press. 2017. 684 p.
5. Ловкис В.Б., Деменок Н.А. Совершенствование систем отопления пленочных рас-садно-овощных теплиц // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве. 2011. С. 55–58.
6. Ловкис В.Б., Деменок Н.А. Энергосберегающие технологии инфракрасного обогрева // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве. 2014. С. 66–71.
7. Pieters J.G., Deltour J.M. Modelling solar energy input in greenhouses // Solar Energy. 1999. Vol. 67. No. 1. Pp. 119–130.
8. Bargach M.N., Tadili R., Dahman A.S., Boukallouch M. Survey of thermal performances of a solar system used for the heating of agricultural greenhouses in Morocco // Renewable Energy. 2000. Vol. 20. No 4. Pp. 415–433.
9. Tong Y., Nishioka N., Ohyama K., Kozai T. Greenhouse heating using heat pumps with a high coefficient of performance (COP) // Biosystems Engineering. 2010. Vol. 106. No. 4. Pp. 405–411.
10. Aye L., Fuller R.J., Canal A. Evaluation of a heat pump system for greenhouse heating // International Journal of Thermal Sciences. 2010. Vol. 49. No. 1. Pp. 202–208.
11. 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. Vol. 26. No. 1. Pp. 1–19.
12. Болотских Н.Н. Инфракрасное отопление теплиц с помощью пленочных электронагревателей // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2015. No 7 (138). С. 30–35.
13. РД-АПК 1.10.09.01-14. Методические рекомендации по технологическому проектированию теплиц и тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады: утв. врио директора Департамента научно-технологической политики и образования Минсельхоза России Вельма-товым А. А. от 13.08.2014. М.: ФГБНУ «Росин-формагротех». 2014. 104 с.
14. Солод Л.В. Определение интенсивности облучения при проектировании систем газового лучистого отопления // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2013. No 3 (180). С. 24–28.
15. СП 60.13330.2016. Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: актуализированная редакция СНиП 41-01-2003: утв. Минстроем России от 16.12.2016 No 968/пр. Введ. 17.06.2017. М.: ФГУП «Стандартинформ». 2016. 104 с.
16. СП 50.13330.2012. Свод правил. Тепловая защита зданий: актуализированная редакция СНиП 23-02-2003: утв. Минрегионом России от 30.06.2012 No 265. Введ. 01.01.2012. М.: ФАУ «ФЦС». 2012. 96 с.
17. Богословский В.Н., Сканави А.Н. Отопление: учебник для вузов. М.: Стройиздат. 1991. 735 с.
18. СП 131.13330.2018. Свод правил. Строительная климатология: актуализированная редакция СНиП 23-01-99*: утв. Минстроем России от 28.11.2018 No 763/пр. Введ. 29.05.2019. М.: ФГУП «Стандартинформ». 2018. 107 с.
19. Климов В.В. Оборудование теплиц для подсобных и личных хозяйств. М.: Энергоатомиздат. 1992. 96 с.
20. Pavlov M., Lukin S., Derevianko O. Modeling of greenhouse radiant heating // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 193. Pp. 03006. DOI:org/10.1051/matecconf/201819303006.
21. Kavga A., Konstas I., Panidis T. Assessment of infrared heating benefits in a production green-house // Applied Engineering in Agriculture. 2015. Vol. 31 (1). Pp. 143–151.
22. 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. Pp. 859–863.
23. Aye L., Fuller R.J., Canal A. Evaluation of a heat pump system for greenhouse heating // International Journal of Thermal Sciences. 2010. No. 1. Vol. 49. Pp. 202–208.

Информация об авторах

Павлов Михаил Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоводоснабжения. E-mail: pavlov_kaftgv@mail.ru. Вологодский государственный университет. Россия, 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15, каб. 109.

Карпов Денис Федорович, старший преподаватель кафедры теплогазоводоснабжения. E-mail: karpov_denis_85@mail.ru. Вологодский государственный университет. Россия, 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15, каб. 109.

Поступила в октябре 2019 г.

© Павлов М.В., Карпов Д.Ф., 2019

***Pavlov M.V., Karpov D.F.**
Vologda State University
Russia, 160000, Vologda, Lenina st., 15,
**E-mail: pavlov_kaftgv@mail.ru*

CALCULATION METHOD OF CULTIVATION FACILITY COMBINED HEATING SYSTEM USING WINTER GREENHOUSE AS AN EXAMPLE

Abstract. *Modern systems of artificial heating of cultivation structures on the example of winter greenhouses intended for year-round use require the development of sufficiently accurate and reliable methods of calculation. According to the calculations, a decentralized heating system of agricultural facilities, which includes only ceiling infrared heating elements, is justified only in a moderately cold period of the year. At lower outdoor temperatures, mainly in January, the indoor temperature may drop below standard values due to the specifics of radiant heating. Therefore, the article considers the method of calculating heat power of the radiant and convective heating system that includes infrared emitters for soil heating and convective heating devices for maintaining the target indoor air temperature. The calculation procedure of radiant and convective (combined) heating system comes to the calculation of incoming and outgoing heat and mass fluxes as well as finding unknown microclimate parameters (first of all, inside air temperature) that form design heat and humidity conditions of an agrobiotechnological facility. The proposed calculation method has been tested at the industrial greenhouse "Fermer 7.5".*

Keywords: *radiant-convective heating, combined heating, infrared emitter, thermal capacity, heater, soil, greenhouse.*

REFERENCES

1. Karpov D.F., Sinitsyn A.A. Techno-economic assesment of radiant heating effectiveness in greenhouses [Tekhniko-ekonomicheskaya ocenka effektivnosti primeneniya luchistogo otopleniya v teplicah]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 1. Pp. 73–80. (rus)
2. Lyashenko T.A., Cheremisina S.A. Study of the energy efficiency of the heating system in greenhouses for the conditions of the Amur region [Issledovanie energoeffektivnosti sistemy otopleniya v teplicah dlya uslovij Amurskoj oblasti]. Trends in the development of science and education. 2018. No. 35. Pp. 13–17. (rus)
3. Lovkis V.B., Demenok N.A., Lovkis O.V., Martinov O.G. Modern approach to heating greenhouses [Sovremennyj podhod k otopleniyu teplic]. Mechanization and electrification of agriculture. 2012. Pp. 334–342. (rus)
4. Hanan J.J. Greenhouses: advanced technology for protected horticulture. Colorado: CRC Press, 2017. 684 p.
5. Lovkis V.B., Demenok N.A. Improvement of heating systems of film seedling and vegetable greenhouses [Sovershenstvovanie sistem otopleniya plenochnyh rassadno-ovoshchnyh teplic]. Scientific and technical progress in agricultural production. 2011. Pp. 55–58. (rus)
6. Lovkis V.B., Demenok N.A. Energy-saving technologies of infrared heating [Energosberegayushchie tekhnologii infrakrasnogo obogreva]. Scientific and technical progress in agricultural production. 2014. Pp. 66–71. (rus)
7. Pieters J.G., Deltour J.M. Modelling solar energy input in greenhouses. Solar Energy. 1999. Vol. 67. No. 1. Pp. 119–130.
8. Bargach, M.N, Tadili R., Dahman A.S., Boukallouch M. Survey of thermal performances of a solar system used for the heating of agricultural greenhouses in Morocco. Renewable Energy. 2000. Vol. 20. No. 4. Pp. 415–433.
9. Tong Y., Nishioka N., Ohyama K., Kozai T. Greenhouse heating using heat pumps with a high coefficient of performance (COP). Biosystems Engineering. 2010. Vol. 106. No. 4. Pp. 405–411.
10. Aye L., Fuller R.J., Canal A. Evaluation of a heat pump system for greenhouse heating. International Journal of Thermal Sciences. 2010. Vol. 49. No. 1. Pp. 202–208.
11. 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. Vol. 26. No. 1. Pp. 1–19.
12. Bolotskikh N.N. Infrared heating of greenhouses by means of film electric heaters [Infrakrasnoe otoplenie teplic s pomoshch'yu plenochnyh elektronagrevatelej]. Energy Saving. Energy. Energy audit. 2015. No. 7 (138). Pp. 30–35. (rus)
13. GD-AIC 1.10.09.01-14. Methodical recommendations on the technological design of greenhouses and greenhouse plants for growing vegetables and seedlings [Metodicheskie rekomendacii po tekhnologicheskomu proektirovaniyu teplic i teplichnyh kombinatov dlya vyrashchivaniya ovoshchej i rassady]. 2014. 104 p. (rus)
14. Solod L.V. Determination of irradiation intensity when designing gas radiation heating systems

[Opredelenie intensivnosti oblucheniya pri proektirovaniy sistem gazovogo luchistogo otopeniya]. Bulletin of Pridniprovs'ka state academy of civil engineering and architecture. 2013. No. 3 (180). Pp. 24–28. (rus)

15. SR 60.13330.2016. Heating, ventilation and air conditioning [Otoplenie, ventilyaciya i kondicionirovanie vozduha]. 2016. 104 p. (rus)

16. SR 50.13330.2012. Thermal protection of buildings [Teplovaya zashchita zdaniy]. 2012. 96 p. (rus)

17. Bogoslovsky V.N., Skanavi A.N. Heating [Otoplenie]: textbook for universities. Moscow: Strojizdat. 1991. 735 p. (rus)

18. SR 131.13330.2018. Building climatology [Stroitel'naya klimatologiya]. 2018. 107 p. (rus)

19. Klimov V.V. Equipment for greenhouses for subsidiary and personal farms [Oborudovanie

teplic dlya podsobnyh i lichnyh hozyajstv]. Moscow: Energoatomizdat. 1992. 96 p. (rus)

20. Pavlov M., Lukin S., Derevianko O. Modeling of greenhouse radiant heating. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 193. Pp. 03006.

21. Kavga A., Konstas I., Panidis T. Assessment of infrared heating benefits in a production green-house. Applied Engineering in Agriculture. 2015. Vol. 31 (1). Pp. 143–151.

22. 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. Pp. 859–863.

23. Aye L., Fuller R.J., Canal A. Evaluation of a heat pump system for greenhouse heating. International Journal of Thermal Sciences. 2010. No. 1. Vol. 49. Pp. 202–208.

Information about the authors

Pavlov, Mikhail V. PhD, Associate Professor. E-mail: pavlov_kaftgv@mail.ru. Vologda state university. Office 109, 15, Lenin St., Vologda, 160000, Russia.

Karpov, Denis F. Senior Lecturer. E-mail: karpov_denis_85@mail.ru. Vologda state university. Office 109, 15, Lenin St., Vologda, 160000, Russia.

Received in October 2019

Для цитирования:

Павлов М.В., Карпов Д.Ф. Способ расчета комбинированной системы отопления культивационного сооружения на примере зимней теплицы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 12. С. 47–55. DOI: 10.34031/2071-7318-2019-4-12-47-55

For citation:

Pavlov M.V., Karpov D.F. Calculation method of cultivation facility combined heating system using winter greenhouse as an example. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 12. Pp. 47–55. DOI: 10.34031/2071-7318-2019-4-12-47-55