



МЕТОД РАСЧЕТА ГАЗОЛУЧИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ ЗИМНЕЙ ТЕПЛИЦЫ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ПОДОГРЕВОМ ПРИТОЧНОГО ВОЗДУХА

В статье рассмотрен вариант газолучистого отопления при условии предварительного подогрева наружного воздуха перед его подачей в теплицу с целью организации воздухообмена. Представлены результаты расчета отопления теплицы с предварительным подогревом приточного воздуха.

Газолучистое отопление, инфракрасный излучатель, подогреватель воздуха, почва, зимняя теплица.

Газолучистое отопление является перспективным способом обогрева зимних теплиц, так как растения круглогодично будут получать естественное инфракрасное излучение, а в случае утилизации продуктов сгорания газообразного топлива – также и углекислый газ, который им необходим для реакции фотосинтеза.

Основная часть топливно-энергетических ресурсов в сельском хозяйстве (30 ÷ 60 %) расходуется на отопление теплиц, предназначенных для круглогодичного выращивания растений (овощей, рассады и др.) в защищенном грунте. Это, в первую очередь, связано с использованием в качестве ограждения стекла и поликарбоната (монолитного, сотового), которые обладают сравнительно невысокими теплозащитными свойствами [1]. Немаловажную роль в потреблении тепловой энергии играет вентиляция в случае забора воздуха из окружающей среды без предварительного его подогрева (особенно в зимний период).

В настоящее время существуют различные пути повышения энергетической эффективности зимних теплиц, как, например, за счет использования пиролизных установок [2] или солнечной энергии [3]. Такие инновационные технологии, несмотря на нетрадиционные подходы к обогреву культивационных

сооружений, имеют недостатки: зависимость от географических условий и факторов окружающей среды. Поэтому альтернативным вариантом может стать инфракрасный обогрев почвы и помещения теплицы с использованием в качестве источников теплоты потолочных инфракрасных излучателей. Системы лучистого отопления позволяют: предотвратить появление бактерий, оказывающих негативное влияние на ростки; равномерно обогреть все растения и грунт в теплице; повысить интенсивность роста и развития растений; получить высокую урожайность. Кроме того, инфракрасный обогрев не приводит к осушению воздуха, обладает высокой надежностью и, как следствие, продолжительным периодом бесперебойной эксплуатации [4].

Как известно, основное назначение зимних теплиц – это поддержание требуемых параметров микроклимата в холодный период года. В таблице представлены в качестве примера параметры температурно-влажностного режима теплицы для различных видов сельскохозяйственных культур в период до плодоношения, регламентированные методическими рекомендациями [5].

Таблица

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

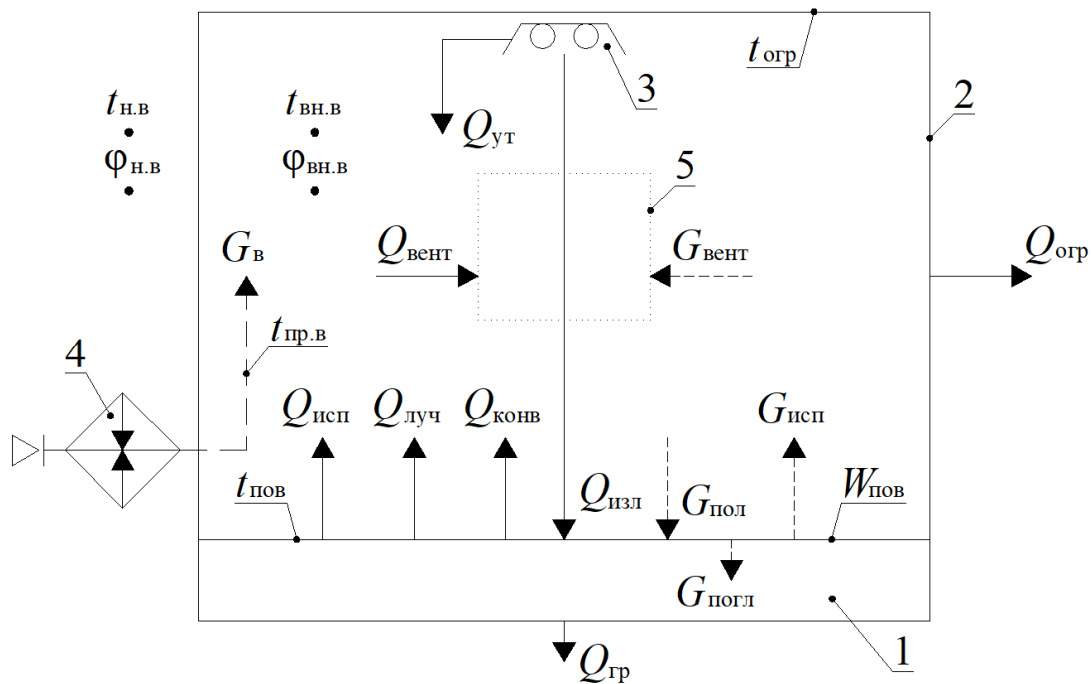


Рис. 1. Расчетная схема газолучистого отопления зимней теплицы: 1 – почва; 2 – ограждение; 3 – газовый инфракрасный излучатель; 4 – подогреватель воздуха; 5 – вытяжной вентиляционный проем

Как показали предыдущие расчеты, лучистое отопление зимней теплицы в случае непосредственного забора наружного воздуха для нужд вентиляции без предварительного его подогрева не позволяет поддерживать заданный тепловой режим помещения (табл.). Решением данной проблемы может стать прохождение потока холодного воздуха через подогреватель (калорифер) перед его подачей в теплицу. Это позволит не только поддерживать заданный тепловой режим в помещении, но и снизить тепловую нагрузку инфракрасного обогрева, предотвратить ожоги растений инфракрасными волнами, уменьшить снеговую нагрузку на теплицу за счет увеличения температуры ограждения. С точки зрения экономической целесообразности стоит рассмотреть газолучистое отопление. Теплота продуктов сгорания в ходе сжигания газообразного топлива также может стать приходной статьей теплового баланса. Кроме того, растения в теплице дополнительно будут получать углекислый газ (диоксид углерода CO_2), который им необходим для реакции фотосинтеза.

На рисунке 1 представлена расчетная схема газолучистого отопления зимней теплицы с предварительным подогревом приточного воздуха.

Тепловлажностный режим зимней теплицы (рис. 1), согласно таблице, определяется температурой $t_{\text{вн.в}}$, °С, и относительной влажностью $\phi_{\text{вн.в}}$, % внутреннего воздуха, а также температурой поверхности почвы (1), равной $t_{\text{пов}}$. Влагосодержание поверхности почвы (1) имеет постоянное значение $W_{\text{пов}}$ кг/кг. Температура и относительная влажность наружного воздуха также известны и соответственно составляют $t_{\text{н.в}}$ и $\phi_{\text{н.в}}$. Температура внутренней поверхности ограждения (2)

теплицы ($t_{\text{огр}}$) неизвестна и находится через решение системы уравнений теплового баланса относительно рассматриваемой поверхности. В зимнюю теплицу для нужд вентиляции подается наружный воздух расходом по сухой части $G_{\text{в}}$, кг/с, предварительно нагретый в подогревателе воздуха (4) до температуры $t_{\text{пр.в}}$, величина которой определяется расчетным способом.

В таком случае уравнение теплового баланса зимней теплицы при газолучистом отоплении будет иметь вид:

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

где $Q_{\text{изл}}$ – тепловая мощность газолучистого отопления, Вт; $Q_{\text{ут}} = B_{\text{п}} I_{\text{г}}$ – тепловой поток, поступающий в теплицу от продуктов сгорания газообразного топлива, Вт; $B_{\text{п}}$ – объемный расход газообразного топлива, $\text{м}^3/\text{с}$; $I_{\text{г}}$ – энтальпия продуктов сгорания газообразного топлива на выходе из газового инфракрасного излучателя (3), Дж, приходящаяся на 1 м^3 газообразного топлива; $Q_{\text{огр}}$ – 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 грунт, Вт.

Не приводя в статье промежуточных математических преобразований, запишем уравнение (1) в несколько ином виде:

$$\frac{Q_{\text{изл}}}{\eta_Q} = Q_{\text{огр}} + Q_{\text{вент}} + Q_{\text{гр}}, \text{ Вт}, \quad (2)$$

где η_0 – лучистый КПД газового инфракрасного излучателя (3).

Для расчета газолучистого отопления зимней теплицы также требуется уравнение теплового баланса поверхности почвы (1), которое связывает между собой тепловые и массообменные процессы:

$$\frac{A_1 Q_{\text{изл}}}{1 - k_{\text{отр}}} = Q_{\text{луч}} + Q_{\text{конв1}} + Q_{\text{исп}} + Q_{\text{гр}}, \text{ Вт}, \quad (3)$$

где $k_{\text{отр}} = (1 - A_1)(1 - A_2) \frac{\Phi_{21}}{1 - \Phi_{22}(1 - A_2)}$ – 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; $Q_{\text{луч}}$ – результирующее тепловое излучение, возникающее между поверхностью почвы (1) и внутренней поверхностью ограждения (2) теплицы, Вт; $Q_{\text{конв1}}$ – 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.

Как было отмечено ранее, для выполнения расчета газолучистого отопления зимней теплицы также необходима система уравнений теплового баланса ограждения (2) теплицы, одно из которых имеет вид:

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

где $Q_{\text{конв2}}$ – конвективная составляющая теплообмена между внутренним воздухом и внутренней поверхностью ограждения (2) теплицы, Вт.

В то же время тепловой поток, уходящий через ограждение (2) теплицы в окружающую среду, по уравнению теплопередачи будет равен:

$$Q_{\text{отр}} = \frac{t_{\text{отр}} - t_{\text{н.в}}}{R_t} F_{\text{отр}} (1 + \beta_{\text{инф}}), \text{ Вт}, \quad (5)$$

где $R_t = R_{\text{отр}} + 1/\alpha_{\text{н}}$ – сопротивление теплопередаче ограждения (2) теплицы, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; $R_{\text{отр}}$ – термическое сопротивление ограждения (2) теплицы, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждения (2), $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. По данным таблицы 6 свода правил [6] $\alpha_{\text{н}} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $F_{\text{отр}}$ – 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 [7].

Тепловая мощность подогревателя воздуха (4) рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{вт}} = G_{\text{в}} (h_{\text{пр.в}} - h_{\text{н.в}}), \text{ Вт}, \quad (6)$$

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

Рассмотрим на примере индивидуальной промышленной теплицы «Фермер 7.5» (рис. 2) метод расчета газолучистого отопления.

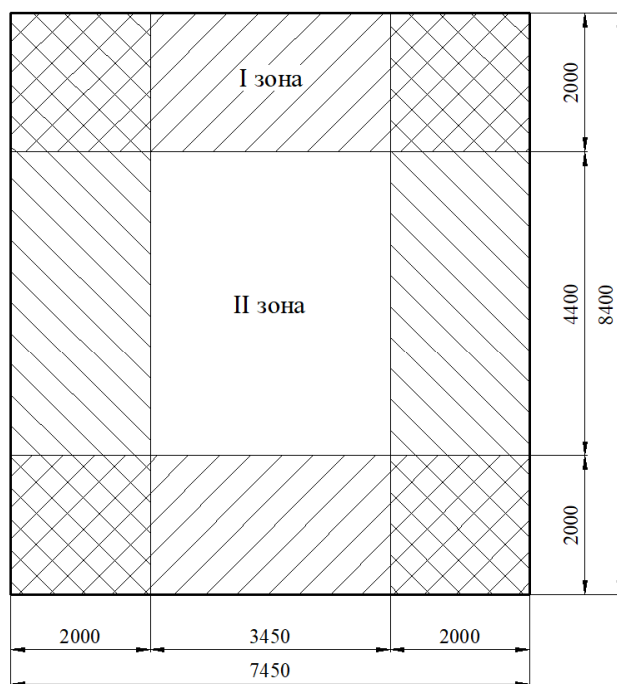
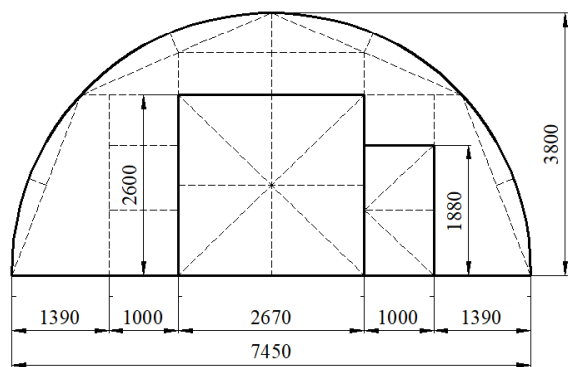


Рис. 2. Промышленная теплица «Фермер 7.5» и схема разбивки грунта на зоны

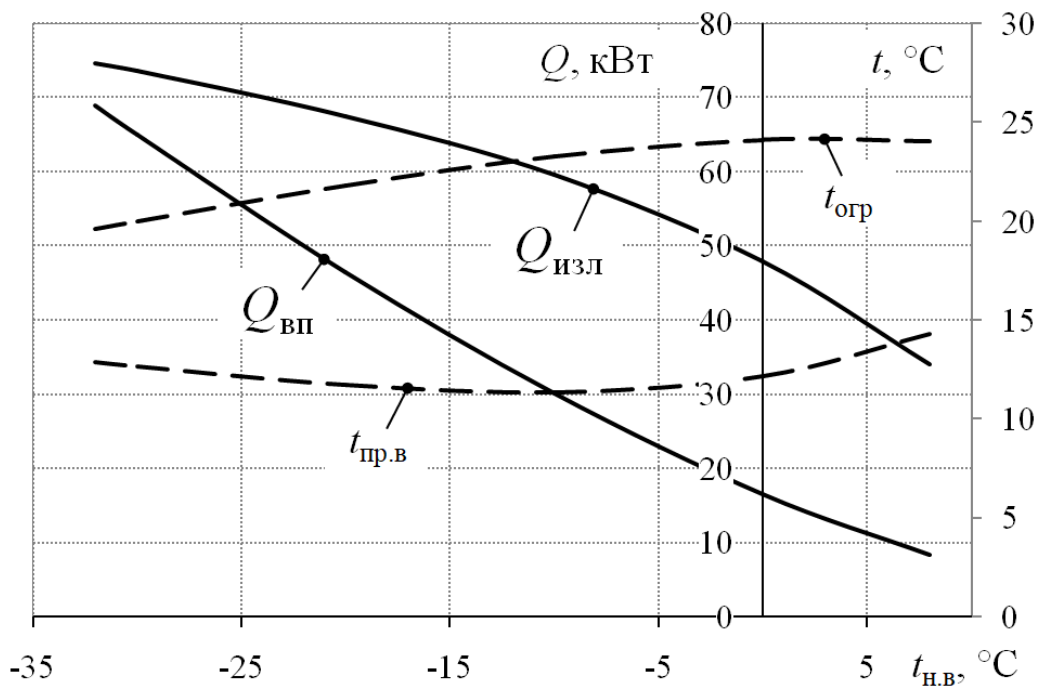


Рис. 3. Тепловая мощность газолучистого отопления зимней теплицы, подогревателя воздуха, температура приточного воздуха и ограждения теплицы

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 $t_{пов} = 24$ °C; 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 $R_{огр} = 0,25$ 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.): температура $t_{вн.в} = 22$ °C; относительная влажность $\varphi_{вн.в} = 75\%$.

5. Расчетные параметры наружного воздуха для условий города Вологды [8]: температура $t_{н.в} = -32$ °C; относительная влажность $\varphi_{н.в} = 85\%$.

6. Параметры вентиляции: принудительная вентиляция с механическим пробуждением; кратность воздухообмена $n_b = 1,0$ м³/мин [7].

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

8. Лучистый КПД газового инфракрасного излучателя $\eta_Q = 0,80$.

Расчет газолучистого отопления промышленной теплицы «Фермер 7.5» (рис. 2) выполнен в математическом редакторе «Mathcad».

По итогам программного расчета газолучистого отопления промышленной теплицы «Фермер 7.5» получены следующие результаты:

1. Температура внутренней поверхности ограждения теплицы $t_{огр} = 19,6$ °C.

2. Температура приточного воздуха $t_{пр.в} = 12,9$ °C. Расчетная тепловая мощность подогревателя воздуха $Q_{вп} = 68,9$ кВт.

3. Требуемая мощность инфракрасного излучения $Q_{изл} = 74,7$ кВт, тепловой поток от продуктов сгорания газообразного топлива $Q_{ут} = 18,7$ кВт.

4. Необходимый расход воды на полив почвы $G_{пол} = 67,9$ кг/ч.

5. Потери теплоты: через ограждение теплицы $Q_{огр} = 29,6$ кВт; с вентиляционным воздухом, уходящим из зимней теплицы в окружающую среду, $Q_{вент} = 62,0$ кВт; в грунт $Q_{гр} = 1,82$ кВт.

6. Потери теплоты от теплообмена излучением между поверхностью почвы и внутренней поверхностью ограждения теплицы $Q_{луч} = 1,02$ кВт.

7. Потери теплоты от конвективного теплообмена между внутренним воздухом и поверхностью почвы в теплице $Q_{конв1} = 0,04$ кВт; между внутренним воздухом и внутренней поверхностью ограждения теплицы $Q_{конв2} = 2,92$ кВт.

8. Потери теплоты, связанные с процессом испарения влаги с поверхности почвы в теплице, составили $Q_{исп} = 46,1$ кВт.

Предварительный подогрев наружного воздуха в калорифере перед его подачей в зимнюю теплицу привел к тому, что температура ограждения достигла необходимых значений. Кроме того, дополнительное

количество теплоты, полученное от продуктов сгорания газообразного топлива, позволило снизить тепловую нагрузку подогревателя воздуха. За счет существенного уменьшения тепловых потерь на нужды вентиляции (почти в два раза) тепловая мощность газолучистого отопления также достигла разумных пределов. Здесь стоит отметить, что вычисления выполнены для расчетных условий, т.е. при минимальной температуре наружного воздуха, согласно своду правил [8].

На рисунке 3 показана зависимость расчетной тепловой мощности газолучистого отопления $Q_{изл}$, Вт, и подогревателя воздуха $Q_{вп}$ от температуры наружного воздуха $t_{н.в}$, °С, в течение отопительного сезона. Дополнительными осями выступили температуры ограждения теплицы $t_{огр}$ и приточного воздуха $t_{пр.в}$.

Согласно рисунку 3, с ростом температуры наружного воздуха $t_{н.в}$, °С закономерно будут снижаться требуемая тепловая мощность газолучистой системы отопления $Q_{изл}$, Вт и необходимый расход теплоты на подогрев приточного воздуха $Q_{вп}$, так как тепловые потери через ограждение теплицы, на нужды вентиляции и в грунт начнут уменьшаться. Изменения температуры наружного воздуха $t_{н.в}$ не сильно скажутся на температуре ограждения $t_{огр}$ и приточного воздуха $t_{пр.в}$, что позволяет поддерживать практически постоянным тепловой режим теплицы и почвы. В среднем за отопительный период температура ограждения промышленной теплицы «Фермер 7.5» (рис. 2) и приточного воздуха соответственно составили $t_{огр} = 22,1$ °С и $t_{пр.в} = 12,5$ °С.

Литература

1. Липатов, А. В. Повышение эффективности систем отопления теплиц / А. В. Липатов, Е. В. Спиридо-

нова, А. Ф. Фролов // Инновационные технологии в строительстве, теплогазоснабжении и энергообеспечении. – 2017. – С. 108–112.

2. Узаков, Г. Н. Обоснование эффективности применения пиролизной установки для отопления теплиц / Г. Н. Узаков, Х. А. Давланов, Ю. Г. Узакова // Молодой ученый. – 2015. – № 19 (99). – С. 219–223.

3. Романова, М. И. Энергоэффективный метод использования излишек тепла солнечного коллектора / М. И. Романова, В. В. Шерстюков // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 4 (23). – С. 84.

4. Беляева, Е. А. Преимущество в использовании инфракрасной системы отопления теплиц / Е. А. Беляева, А. А. Хальметов // Проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения. – 2018. – С. 46–48.

5. РД-АПК 1.10.09.01-14. Методические рекомендации по технологическому проектированию теплиц и тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады : утверждено врио директора Департамента научно-технологической политики и образования Минсельхоза России Вельматовым А. А. от 13.08.2014. – Москва : ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. – 104 с.

6. СП 50.13330.2012. Свод правил. Тепловая защита зданий: актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 : утвержден Минрегионом России от 30.06.2012 № 265 : введен 01.01.2012. – Москва : ФАУ ФЦС, 2012. – 96 с.

7. Климов, В. В. Оборудование теплиц для подсобных и личных хозяйств / В. В. Климов. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 96 с.

8. СП 131.13330.2012. Свод правил. Строительная климатология: актуализированная редакция СНиП 23-02-99* : утвержден Минрегионом России от 30.06.2012 № 275 : введен 01.01.2013. – Москва : ФАУ ФЦС, 2015. – 120 с.

M. V. Pavlov

CALCULATION METHOD OF WINTER GREENHOUSE GAS-FIRED RADIANT HEATING WITH PRE-HEATING OF SUPPLY AIR

The article considers the option of gas-fired radiant heating for pre-heating of the outdoor air before being fed into the greenhouse in order to organize air exchange. The results of calculating the heating of a greenhouse with pre-heating of the supply air are presented.

Gas radiant heating, infrared emitter, air heater; soil, winter greenhouse.