

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-5-57-64>

УДК 631.344.8:631.544.41



## МЕТОД И АЛГОРИТМ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ГАЗОЛУЧИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ КУЛЬТИВАЦИОННОГО СООРУЖЕНИЯ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ПОДОГРЕВОМ ПРИТОЧНОГО ВОЗДУХА

М.В. Павлов<sup>✉</sup>, Д.Ф. Карпов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Вологодский государственный университет»; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, Россия

**Аннотация.** Разработка новых технологий поддержания требуемого микроклимата в культивационных сооружениях предполагает наличие соответствующей математической базы для определения расчетной тепловой мощности отопительного оборудования и параметров работы системы отопления, зависящих от факторов окружающей среды. Цель исследований – разработать программный метод расчета системы газолучистого отопления культивационного сооружения с предварительным подогревом приточного воздуха. В основе метода расчета лежит система взаимосвязанных уравнений теплового баланса помещения, его ограждения и поверхности почвы. Решение, помимо прочего, включает в себя утилизацию теплоты от продуктов сгорания газообразного топлива, а также лучистый теплообмен с многократным отражением и самооблучением, происходящий между поверхностями почвы и ограждения. В программном методе расчета также учитывается влияние испарения влаги с поверхности почвы на теплообменные процессы, протекающие в культивационном сооружении. На основе разработанного программного метода расчета определены параметры работы системы газолучистого отопления культивационного сооружения на примере промышленной теплицы «Фермер 7.5» (Российская Федерация). При заданных исходных условиях получены следующие основные результаты расчета: требуемая тепловая мощность газового инфракрасного излучателя (68,7 кВт); расход тепловой энергии, необходимый на нагрев приточного воздуха перед его подачей в помещение (35,5 кВт); температура предварительно нагретого приточного воздуха (-11,6°C); температура внутренней поверхности ограждения (18,6°C). Указаны основные допущения, принятые при разработке метода расчета. Определены перспективы дальнейших научных исследований.

**Ключевые слова:** газолучистое отопление, культивационное сооружение, газовый инфракрасный излучатель, газовый воздухонагреватель, почва, промышленная теплица

**Формат цитирования:** Павлов М.В., Карпов Д.Ф. Метод и алгоритм расчета системы газолучистого отопления культивационного сооружения с предварительным подогревом приточного воздуха // Природообустройство. 2024. № 5. С. 57-64. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-5-57-64>

Original article

## THE METHOD AND ALGORITHM FOR CALCULATING THE SYSTEM OF GAS-RADIANT HEATING OF A CULTIVATION FACILITY WITH PREHEATING OF THE SUPPLY AIR

M.V. Pavlov<sup>✉</sup>, D.F. Karpov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Vologda State University", 15 Lenin St., Vologda, 160000, Russia

**Abstract.** The development of new technologies for maintaining the required microclimate in cultivation facilities presupposes the availability of an appropriate mathematical basis for determining the estimated thermal capacity of heating equipment and the parameters of the heating system, depending on environmental factors. The purpose of the research is to develop a software method for calculating the system of gas-radiant heating of a cultivation facility with preheating of the supply air. The calculation method is based on a system of interrelated equations of the thermal balance of the room, its enclosure and the soil surface. The solution, among other things, includes the utilization of heat from the combustion products of gaseous fuels, as well as radiant heat exchange with multiple reflection and self-radiation occurring between the surfaces of the soil and the fence. The software calculation method also takes into account the effect of moisture evaporation from the soil surface on the heat exchange processes

occurring in the cultivation facility. Based on the developed software calculation method, the parameters of the operation of the gas-flue heating system of a cultivation facility are determined using the example of the industrial greenhouse "Farmer 7.5" (Russian Federation). Under the given initial conditions, the following main calculation results were obtained: the required thermal power of the gas infrared radiator is 68.7 kW; the thermal energy consumption required to heat the supply air before it is supplied to the room is 35.5 kW; the temperature of the preheated supply air is  $-11.6^{\circ}\text{C}$ ; the temperature of the inner surface of the fence is  $18.6^{\circ}\text{C}$ . The main assumptions adopted in the development of the calculation method are indicated. The prospects for further scientific research have been identified.

**Keywords:** gas-radiant heating, cultivation facility, gas infrared radiator, gas air heater, soil, industrial greenhouse

**Format of citation:** Pavlov M.V., Karpov D.F. Method and algorithm for calculating the system of gas-radiant heating of a cultivation facility with preheating of supply air // Prirodoobustrojstvo. 2024. No. 5. P. 57-64. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-5-57-64>

**Введение.** Тепличное производство является одним из самых энергоемких направлений в сельском хозяйстве. Расход тепловой энергии на нужды отопления в среднем составляет  $30 \div 50\%$  от себестоимости продукции [1]. Это связано в первую очередь с тем, что для проектирования культивационных сооружений используются тонкие светопрозрачные материалы (например, органическое стекло или сотовый поликарбонат) с высоким коэффициентом теплопроводности. Для сравнения: поликарбонат толщиной 10 мм имеет термическое сопротивление более чем в 5 раз меньше термического сопротивления кирпичной кладки, которая даже не является теплоизоляционной конструкцией [2]. Таким образом, стремясь к созданию благоприятного светового режима в помещении для выращивания растений, приходится экономить на тепловой защите. В случае неэффективной работы системы отопления данный фактор негативно скажется на параметрах микроклимата обогреваемого помещения. Как следствие, это может привести к снижению урожайности или даже к гибели растений [3]. В итоге получается замкнутый круг: формируя благоприятные условия для выращивания растений, создаем рисковую ситуацию, которая может привести, особенно в зимний период года, к сокращению производства тепличной продукции. На данный момент единственно возможным способом решения рассматриваемой проблемы является разработка новых, высокотехнологичных систем отопления культивационных сооружений.

Разработка альтернативных решений по теплообеспечению культивационных сооружений, на наш взгляд, может осуществляться двумя путями (при этом возможен совместный подход): 1) применением нетрадиционных (возобновляемых) источников энергии [4, 5]; 2) поиском совершенно новых способов или устройств с целью создания благоприятного теплового

режима в помещении для выращивания растений [6, 7].

Наряду с исследованиями тепловлажностного режима почвы в условиях инфракрасного обогрева [8-11] авторами статьи предложен способ газолучистого отопления культивационного сооружения с применением в качестве основного источника теплоты потолочных газовых инфракрасных излучателей темного типа. С целью поддержания необходимой температуры внутреннего воздуха предлагается предварительный подогрев наружного воздуха перед его подачей в помещение на нужды организованной вентиляции. Очевидно, что новый вариант системы отопления предполагает разработку метода его расчета. Последний должен отражать особенности теплообмена в помещении, а также определять мощность отопительной системы, тепловые потери, переменные параметры микроклимата при предварительно заданных исходных условиях. Так, как помимо обогрева почвы, требуется ее периодическое орошение, метод расчета должен учитывать влияние испарения влаги на теплообменные процессы.

**Цель исследований:** разработать программный метод расчета системы газолучистого отопления культивационного сооружения с предварительным подогревом приточного воздуха.

**Материалы и методы исследований.** На рисунке 1 представлена расчетная схема, которая описывает основные тепловые процессы, происходящие в культивационном сооружении. Данная схема учитывает как поступающие тепловые потоки в помещение, так и уходящие из него потоки тепловой энергии в окружающую среду (тепловые потери).

В соответствии с данными рисунка 1 поток теплоты в виде длинноволнового инфракрасного излучения  $Q_{\text{изл}}$  поступает от потолочного газового инфракрасного излучателя на поверхность почвы. Некоторая часть теплоты от величины  $Q_{\text{изл}}$

поглощается слоем почвы, а остальная часть отражается от поверхности почвы в направлении ограждения культивационного сооружения. При этом теплообмен излучением происходит с многократным отражением, вплоть до samozатухания.

Для компенсации тепловых потерь из помещения культивационного сооружения: через ограждение величиной  $Q_{огр}$ , с вытяжным воздухом  $Q_{вент}$ , уходящим через вентиляционный проем, и в грунт  $Q_{гр}$  – теплового потока  $Q_{изл}$  будет недостаточно. Если поддерживать температуру поверхности почвы  $2 t_{пов}$  постоянной, то температура внутреннего воздуха  $t_{вн.в}$  будет зависеть от температуры наружного воздуха  $t_{н.в}$ . Таким образом, для поддержания теплового режима в помещении культивационного сооружения требуется дополнительный источник теплоты – газовый воздухонагреватель с регулируемой тепловой мощностью  $Q_{вн}$ .

Учитывая особенности работы системы газолучистого отопления культивационного сооружения, стоит отметить, что температура внутреннего воздуха  $t_{вн.в}$  и температура поверхности почвы  $t_{пов}$  будут постоянными величинами, так как должны соответствовать нормативным требованиям. При этом температуры ограждения  $t_{огр}$  и нагретого приточного воздуха  $t_{пр.в}$  будут переменными, так как находятся в прямой зависимости от температуры наружного воздуха  $t_{н.в}$ .

Для разработки метода расчета системы газолучистого отопления культивационного сооружения требуется отдельно рассмотреть взаимосвязанные элементы, участвующие в теплообмене: обогреваемое помещение, поверхность почвы и ограждение.

Согласно данным рисунка 1 уравнение теплового баланса помещения культивационного сооружения будет иметь вид:

$$Q_{изл} + Q_{ут1} + Q_{вн} + Q_{ут2} = Q_{огр} + Q_{вент} + Q_{гр}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где  $Q_{ут1}$  и  $Q_{ут2}$  – утилизируемая теплота от продуктов сгорания газообразного топлива, поступающая в помещение, соответственно, от газового инфракрасного излучателя и газового воздухонагревателя, Вт.

Не приводя здесь промежуточных математических преобразований, уравнение (1) можно переписать следующим образом:

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

где  $\eta_{изл}$  и  $\eta_{вн}$  – коэффициенты преобразования энергии газового инфракрасного излучателя и газового воздухонагревателя 5 соответственно. Они показывают долю начальной энергии, которая перешла в длинноволновое инфракрасное излучение ( $\eta_{изл}$ ) или поступила в помещение культивационного сооружения вместе с нагретым приточным воздухом ( $\eta_{вн}$ ).

Как отмечено выше, падающий поток теплового излучения  $Q_{изл}$  только частично поглощается поверхностью почвы (рис. 2). Отраженная часть инфракрасного излучения (без учета рассеивания энергии) падает на поверхность ограждения культивационного сооружения и также только частично им поглощается. С физической точки зрения данный процесс происходит многократно, с постепенным затуханием. Ситуация усложняется еще тем, что отраженное от ограждения тепловое излучение лишь частично возвращается на поверхность почвы. Некоторая часть отраженного лучистого теплового потока снова падает на поверхность ограждения культивационного сооружения в процессе самооблучения.

В соответствии с данными рисунка 2 поток теплового излучения  $Q_{изл}$  обеспечивает нагрев поверхности и слоя почвы  $t_{пов}$ . Поддержание требуемого теплового режима почвы осуществляется благодаря тепловому балансу приходящего

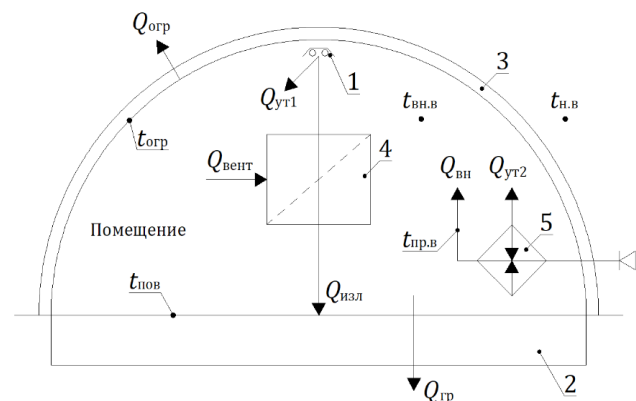


Рис. 1. Расчетная схема теплообмена в культивационном сооружении:

- 1 – газовый инфракрасный излучатель;
- 2 – почва; 3 – ограждение;
- 4 – вытяжной вентиляционный проем;
- 5 – газовый воздухонагреватель

Fig. 1. Calculation scheme of heat transfer in a cultivation facility:

- 1 – gas infrared emitter; 2 – soil; 3 – fencing;
- 4 – exhaust ventilation opening; 5 – gas air heater

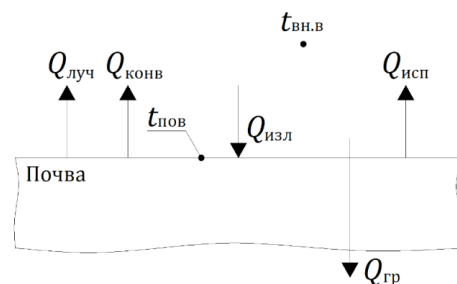


Рис. 2. Расчетная схема теплообмена на поверхности почвы

Fig. 2. Calculation scheme of heat transfer on the soil surface

от газового инфракрасного излучателя теплового потока  $Q_{изл}$  и потерь теплоты, которыми в рассматриваемом случае являются лучистая составляющая теплообмена  $Q_{луч}$ , расход теплоты на конвективный теплообмен с внутренним воздухом помещения  $Q_{конв}$ , имеющим температуру  $t_{вн.в}$ , и затраты тепловой энергии на испарительные процессы величиной  $Q_{исп}$ . Кроме того, часть теплоты  $Q_{гр}$  уходит в окружающую среду через грунт (расчет выполняется по зонам поверхности почвы).

Таким образом, уравнение теплового баланса поверхности почвы будет иметь вид (рис. 2):

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

где  $k_{отр} = (1 - A_1)(1 - A_2) \frac{\varphi_{21}}{1 - \varphi_{22}(1 - A_2)}$  – коэффициент многократного отражения теплового излучения;  $A_1$  и  $A_2$  – коэффициенты поглощения инфракрасного излучения поверхностями почвы и ограждения соответственно;  $\varphi_{21}$  – угловой коэффициент лучеиспускания поверхностью ограждения в сторону поверхности почвы;  $\varphi_{22}$  – коэффициент самооблученности поверхности ограждения культивационного сооружения.

Часть теплового потока от величины  $Q_{изл}$ , не поглощенная поверхностью почвы, поступает на поверхность ограждения культивационного сооружения (рис. 3). При этом часть теплоты отражается в сторону почвы, а другая часть снова падает на поверхность ограждения в процессе самооблучения. Кроме того, вследствие температурного напора, вызванного разностью температуры внутреннего воздуха  $t_{вн.в}$  и ограждения  $t_{отр}$ , формируется конвективная составляющая  $Q_{конв}$ , а в результате разности температуры почвы (на рис. 3 не обозначена) и ограждения  $t_{отр}$  – лучистая составляющая теплообмена  $Q_{луч}$ . В сумме перечисленные тепловые потоки формируют общие тепловые потери через ограждение культивационного сооружения величиной  $Q_{отр}$ .

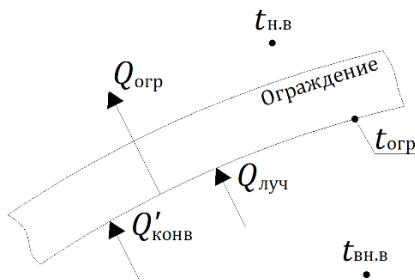


Рис. 3. Расчетная схема теплообмена через ограждение культивационного сооружения

Fig. 3. The design scheme of heat transfer through the fence of the cultivation facility

На основании изложенного запишем уравнение теплового баланса ограждения культивационного сооружения (рис. 3):

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

С другой стороны, потери теплоты через ограждение культивационного сооружения определяются по уравнению теплопередачи:

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

где  $R_{отр}$  – термическое сопротивление ограждающей конструкции,  $\text{м} \cdot \text{К} / \text{Вт}$ ;  $\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждения,  $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $F_{отр}$  – площадь поверхности ограждения культивационного сооружения,  $\text{м}^2$ ;  $\beta_{инф}$  – добавочный коэффициент, учитывающий дополнительные затраты тепловой энергии на нагрев инфилтующегося наружного воздуха.

Решение системы взаимосвязанных уравнений (2)-(5) позволяет определить температуру внутреннего воздуха  $t_{вн.в}$ , °С, и температуру поверхности ограждения  $t_{отр}$  культивационного сооружения. Здесь стоит отметить, что большая часть тепловых потоков, входящих в систему уравнений (2)-(5), определяется по собственным зависимостям, в которые входят, как правило, искомые величины  $t_{вн.в}$  и  $t_{отр}$ . Например, тепловой поток, вызванный конвективным теплообменом между поверхностью почвы и внутренним воздухом, рассчитывается по известному уравнению конвективного теплообмена (уравнению Ньютона-Рихмана):

$$Q_{конв} = \alpha_k (t_{пов} - t_{вн.в}) F_{пов}, \text{ Вт}, \quad (6)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи поверхности почвы при вынужденной конвекции (определяется с помощью теории подобия тепловых процессов через систему безразмерных чисел или критериев),  $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $F_{пов}$  – площадь поверхности почвы,  $\text{м}^2$ .

Тепловая мощность газового инфракрасного излучателя  $Q_{изл}$ , Вт, в отличие от других тепловых потоков не определяется по специальной формуле, а является искомой величиной в системе уравнений теплового баланса культивационного сооружения (2), поверхности почвы (3) и ограждения (4). При этом тепловая мощность газового воздухонагревателя в уравнении (2) рассчитывается по формуле:

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

где  $G_v$  – расход сухой части воздуха,  $\text{кг} / \text{с}$ , участвующего в воздухообмене в помещении, зависит от нормируемой кратности воздухообмена в помещении;  $h_{пр.в}$  и  $h_{н.в}$  – соответственно удельная энтальпия приточного и наружного воздуха,  $\text{Дж} / \text{кг}$ .

В общем виде удельная энтальпия влажного воздуха в уравнении (7) находится следующим образом:

$$h_b = 1005t_b + (2500 + 1,8t_b)d_{п}, \text{ Дж / кг}, \quad (8)$$

где  $d_{п}$  – паросодержание влажного воздуха, г / кг.

**Результаты и их обсуждение.** В соответствии с предложенной системой уравнений (2)-(5) и (7) рассмотрим алгоритм расчета системы газолучистого отопления культивационного сооружения с предварительным подогревом приточного воздуха на нужды организованной вентиляции (рис. 4).

Поясим основные элементы блок-схемы (рис. 4) на примере промышленной теплицы «Фермер 7.5» (Российская Федерация).

*Блок «Исходные параметры»*

1. Геометрические параметры, куда входят линейные размеры промышленной теплицы: ширина  $a = 7,45$  м; длина  $b = 8,40$  м; высота  $h = 3,80$  м.

2. Параметры поверхности почвы. В первую очередь, к ним относятся температура  $t_{пов} = 24$  °С и коэффициент поглощения теплового излучения поверхностью почвы  $A_1 = 0,65$ .

3. Параметры ограждения. Промышленная теплица выполнена из сотового поликарбоната с термическим сопротивлением ограждающей конструкции  $R_{орг} = 0,25$  м<sup>2</sup> · К / Вт и коэффициентом поглощения теплового излучения  $A_2 = 0,94$ .

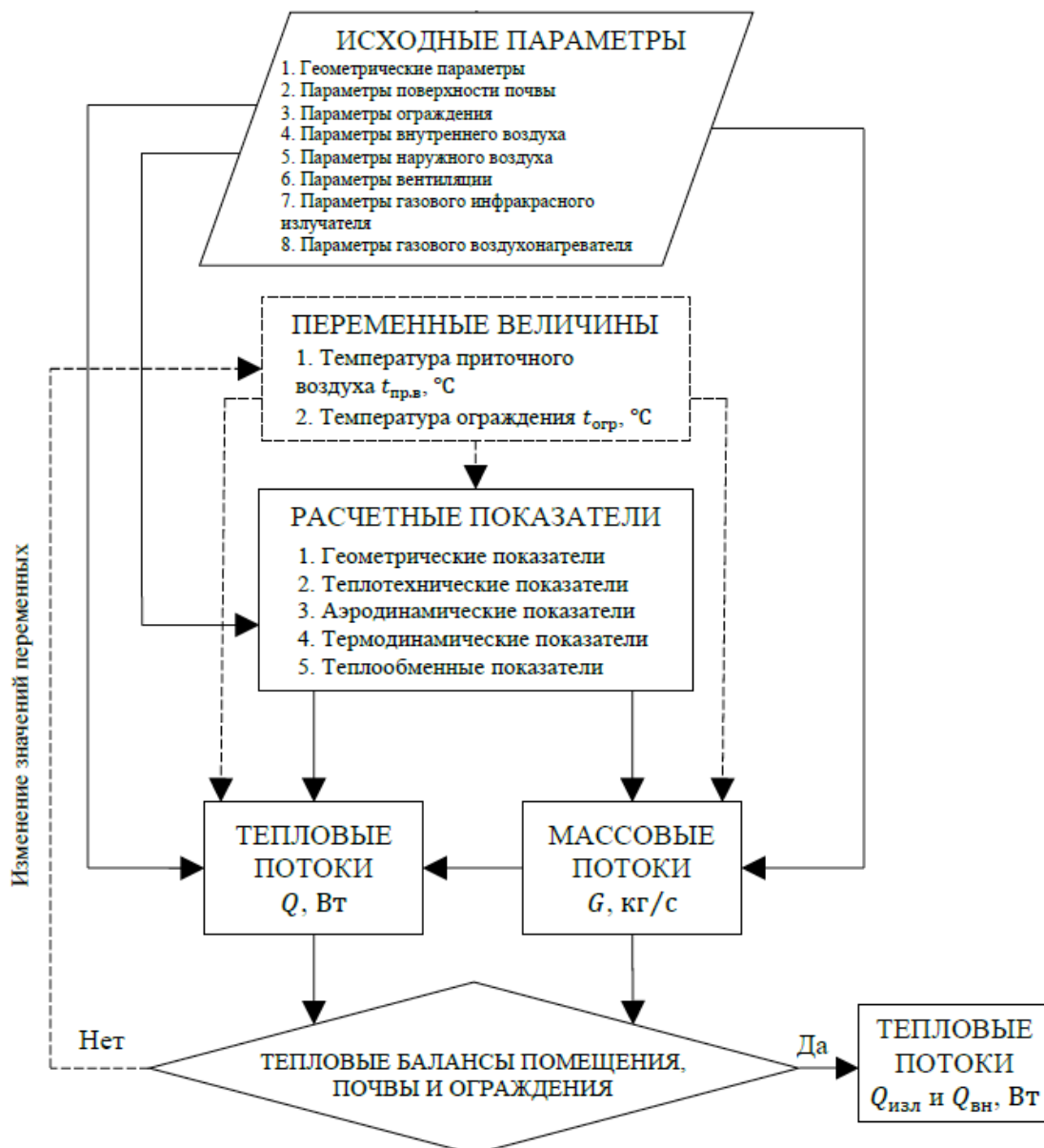


Рис. 4. Газолучистое отопление культивационного сооружения с предварительным подогревом приточного воздуха (блок-схема решения)

Fig. 4. Gas-radiant heating of a cultivation facility with preheating of the supply air (block diagram of the solution)

4. Параметры наружного воздуха. Для условий г. Вологды расчетные значения температуры и относительной влажности наружного воздуха будут, соответственно, равны  $t_{н.в} = -32\text{ }^\circ\text{C}$  и  $\varphi_{н.в} = 85\%$ .

5. Параметры вентиляции. В помещении может быть естественная вентиляция, но, как правило, для поддержания требуемого воздушного режима применяется воздухообмен с механическим побуждением (с использованием вентиляторов). В данном случае кратность воздухообмена в помещении принята как  $n_v = 1,0\text{ м}^3/\text{мин}$  на  $1\text{ м}^2$  расчетной площади.

6. Параметры газового инфракрасного излучателя. В соответствии с паспортными данными газового инфракрасного излучателя коэффициент преобразования энергии равен  $\eta_{изл} = 0,80$ .

7. Параметры газового воздухонагревателя. В соответствии с паспортными данными газового воздухонагревателя коэффициент преобразования энергии равен  $\eta_{вн} = 0,88$ .

#### Блок «Переменные величины»

Переход от исходных параметров к расчетным показателям невозможен без предварительно заданных переменных величин, которыми в данном случае являются:

1. Температура приточного воздуха. По результатам программных вычислений температура предварительно подогретого приточного воздуха составила  $t_{пр.в} \approx -11,6\text{ }^\circ\text{C}$ .

2. Температура ограждения. По результатам программных вычислений температура внутренней поверхности ограждения  $-t_{огр} \approx 18,6\text{ }^\circ\text{C}$ .

#### Блок «Расчетные показатели»

В рассматриваемый блок входят все геометрические, теплотехнические, аэродинамические, термодинамические и другие показатели, полученные с учетом имеющихся исходных данных по результатам программных вычислений. Например, к данному блоку относятся суммарная площадь ограждающей конструкции промышленной теплицы  $F_{огр} \approx 140,29\text{ м}^2$ , площадь поверхности почвы  $F_{пов} = 62,58\text{ м}^2$ , расход сухой части воздуха, поступающего в промышленную теплицу,  $G_b \approx 1,53\text{ кг/с}$ , или средняя скорость воздуха в помещении  $w_b \approx 0,048\text{ м/с}$ .

#### Блок «Тепловые потоки»

Когда известны исходные данные расчета и определены предварительные значения переменных параметров микроклимата культивационного сооружения (температура приточного воздуха  $t_{пр.в}$  и температура поверхности ограждения  $t_{\text{а.о}}$ ), выполняется расчет тепловых потоков, входящих в систему уравнений (2)-(5).

В рассматриваемом примере получены следующие результаты программных вычислений:

– тепловые потери теплопередачей через ограждение промышленной теплицы  $Q_{огр} \approx 29,0\text{ кВт}$ ;

– тепловые потери из помещения промышленной теплицы вместе с уходящим вентиляционным воздухом  $Q_{вент} \approx 95,3\text{ кВт}$ ;

– тепловые потери в окружающую среду через грунт  $Q_{гр} \approx 1,82\text{ кВт}$ ;

– лучистая составляющая теплообмена между поверхностями почвы и ограждения промышленной теплицы  $Q_{луч} \approx 1,251\text{ кВт}$ ;

– конвективная составляющая теплообмена между поверхностью почвы и внутренним воздухом помещения  $Q_{конв} \approx 0,042\text{ кВт}$ ;

– конвективная составляющая теплообмена между внутренним воздухом и ограждением промышленной теплицы  $Q_{конв} \approx 4,17\text{ кВт}$ ;

– расход тепловой энергии на испарение влаги с поверхности почвы  $Q_{исп} \approx 42,0\text{ кВт}$ .

Для определения теплового потока  $Q_{исп}$  требуется предварительно вычислить массовый расход испаряемой влаги, который в данном случае равен  $G_{исп} \approx 0,017\text{ кг/с}$  (или  $\approx 61,2\text{ кг/ч}$ ).

На основе известных потерь теплоты в окружающую среду и тепловых потоков между элементами культивационного сооружения выполняется определение расходов тепловой энергии (расчетных тепловых нагрузок) на поддержание требуемого микроклимата в помещении. В рассматриваемом примере системе уравнений (2)-(5) и (7) соответствует следующее решение: требуемая тепловая мощность газового инфракрасного излучателя  $Q_{изл} \approx 68,7\text{ кВт}$ ; необходимый расход тепловой энергии на нагрев наружного воздуха перед его подачей в промышленную теплицу  $Q_{вн} \approx 35,5\text{ кВт}$ . Таким образом, общая тепловая производительность комбинированной системы отопления промышленной теплицы составила  $Q_{общ} \approx 104,2\text{ кВт}$ .

На основе системы математических уравнений (2)-(5) и (7) разработана программа для расчета лучистого отопления культивационного сооружения с предварительным подогревом приточного воздуха в математическом редакторе Mathcad. Наряду с такими программными системами, как FlowVision или Ansys, позволяющими моделировать тепловые и гидродинамические процессы физических тел и сред, разработанный программный продукт предназначен для решения практико-ориентированных инженерных задач, связанных в первую очередь с определением необходимой тепловой мощности системы газолучистого отопления

при заданных условиях с целью обеспечения требуемых параметров микроклимата в культивационном сооружении.

### Выводы

Несмотря на имеющиеся технические трудности выполнения программных вычислений и большое количество расчетных значений, предложенный метод расчета предполагает ряд допущений. Во-первых, не учитывается влияние растений на теплообменные процессы в помещении и почве. Как известно, теплообмен излучением достаточно сложен в расчетах за счет бесконечного числа поглощений и отражений теплового потока, особенно при большом количестве тел, участвующих в теплообмене. С учетом вегетационного периода развития растений данная проблема становится практически нерешаемой. Во-вторых, внутренней воздух, строго говоря, не является диатермической средой. Как известно, водяные пары в составе влажного воздуха поглощают длинноволновое инфракрасное излучение. В программном расчете данный фактор как допущение не учитывается. Предполагается, что

в лучистом теплообмене участвуют только три основных элемента: газовый инфракрасный излучатель, поверхность почвы и внутренняя поверхность ограждения культивационного сооружения (не учитываются присутствие людей или наличие светотехнического оборудования).

На наш взгляд, программный метод расчета должен быть не усложнен, а наоборот, сведен до относительно упрощенной инженерной методики расчета. В дальнейшем планируется построение системы графиков и использования простых математических уравнений с поправочными (корректирующими) коэффициентами, благодаря которым инженер-проектировщик за короткий срок мог бы получить основные результаты расчета: требуемую тепловую мощность газового инфракрасного излучателя и расход тепловой энергии, необходимый для нагрева наружного воздуха в газовом воздухоподогревателе перед его подачей в помещение. Очевидно, что на начальном этапе разработанная инженерная методика расчета должна быть верифицирована с помощью существующего программного метода.

### Список использованных источников

1. **Ляшенко Т.А., Черемисина С.А.** Исследование энергоэффективности системы отопления в теплицах для условий Амурской области // Тенденции развития науки и образования. 2018. № 35-3. С. 13-17. DOI: 10.18411/lj-28-02-2018-43.
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. 2017. С. 108-112.
3. **Сазонова С.А., Николенко С.Д., Манохин М.В.** Разработка математических моделей для мониторинга водяного отопления теплиц с саженцами ценных пород леса // Лесотехнический журнал. 2018. Т. 8, № 3 (31). С. 187-194. DOI: 10.12737/article\_5b97a15e9393c4.46673542.
4. **Минцаев М.Ш., Якубов Т.В., Барзаева М.А.** Технично-экономическое обоснование использования геотермальных ресурсов для отопления тепличных комплексов // Вести газовой науки. 2021. № 4 (49). С. 176-183.
5. **Ежов С.А.** Особенности использования возобновляемых энергетических ресурсов в системах отопления теплиц / Токарева А.Н., Демченко М.С., Липкович И.Э. / Современные научные исследования: проблемы и перспективы: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции. Киров: 2022. С. 124-128.
6. **Цымбалюк Ю.В.** Интегрированная система отопления современных теплиц с применением фазопереходных тепловых аккумуляторов // Перспективы развития строительного комплекса. 2016. № 1. С. 102-106.
7. **Беляева Е.А., Хальметов А.А.** Система работы инфракрасного отопления с помощью пленочных электронагревателей // Инновации природообустройства

### References

1. **Lyashenko T.A., Cheremisina S.A.** Study of energy efficiency of the heating system in greenhouses for the conditions of the Amur region // Trends in the development of science and education. 2018. № 35-3. P. 13-17. DOI: 10.18411/lj-28-02-2018-43.
2. **Lipatov A.V., Spiridonova E.V., Frolov A.F.** Improving the efficiency of greenhouse heating systems // Innovation technologies in construction heat-gas supply and energy providing: materials of the Vth International scientific-practical conference. 2017. P. 108-112.
3. **Sazonova S.A., Nikolenko S.D., Manokhin M.V.** Development of mathematical models for monitoring water heating of greenhouses with seedlings of valuable forest species // Forestry journal. 2018. V. 8. № 3 (31). P. 187-194. DOI: 10.12737/article\_5b97a15e9393c4.46673542.
4. **MintsaeV M.Sh., Yakubov T.V., Barzaeva M.A.** Feasibility study of the use of geothermal resources for heating greenhouse complexes // News of the gas industry. 2021. № 4 (49). P. 176-183.
5. **Ezhov S.A., Tokareva A.N., Demchenko M.S., Lipkovich I.E.** Features of the use of renewable energy resources in greenhouse heating systems // Modern scientific research: problems and perspectives: collection of materials of the VIth International scientific-practical conference. Kirov, 2022. P. 124-128.
6. **Tsybalyuk Y.V.** Integrated heating system of modern greenhouses with the use of phase-transition heat accumulators // Prospects for the development of the construction complex. 2016. № 1. P. 102-106.
7. **Belyaeva E.A., Haljmetov A.A.** Sistem of the work of the infrared heating by means of the strip electric heating // Innovations of nature management and environmental protection: materials of I International scientific-practical

и защиты окружающей среды: материалы I Национальной научно-практической конференции с международным участием. Саратов: ООО КУБиК 2019. С. 18-21.

8. **Павлов М.В., Карпов Д.Ф.** Решение краевой задачи теплопереноса методом источников для условий лучистого обогрева почвы // Природообустройство. 2023. № 4. С. 15-20. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-4-15-20.

9. **Павлов М.В., Карпов Д.Ф.** Решение краевой задачи теплопереноса методом конечного интегрального преобразования Фурье для условий лучистого обогрева почвы // Природообустройство. 2024. № 1. С. 18-24. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-1-18-24.

10. **Павлов М.В., Карпов Д.Ф.** Решение краевой задачи теплопереноса методом совместного применения интегрального преобразования Лапласа и вариационного метода Бубнова-Галеркина для условий лучистого обогрева почвы // Природообустройство. 2024. № 3. С. 21-30. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-3-21-30>

11. **Павлов М.В., Карпов Д.Ф., Сеницын А.А.** и др. Исследование процессов теплопереноса в слое почвы на примере фрезерного торфа при инфракрасно-лучистом обогреве: учебное пособие. Вологда: ВоГУ, 2015. 192 с.

#### Информация об авторах

**Михаил Васильевич Павлов**, доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры теплогазоводоснабжения; Author ID SCOPUS: 57204361039; WoS ResearcherID: AAN-5773-2021; ORCID: 0000-0002-8687-3296; RSCI ID: 564419; SPIN-код: 6544-7267; pavlovmv@vogu35.ru

**Денис Федорович Карпов**, старший преподаватель кафедры теплогазоводоснабжения; Author ID SCOPUS: 57210325021; WoS ResearcherID: AAF-2092-2021; ORCID: 0000-0002-3522-9302; RSCI ID: 564418; SPIN-код: 9241-4996; karpovdf@vogu35.ru

#### Критерии авторства / Criteria of authorship

Павлов М.В. и Карпов Д.Ф. провели теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых выполнили обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов / The authors declare that there are no conflicts of interest

#### Вклад авторов / Contribution of authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 28.06.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 19.08.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 19.08.2024

conference with the international participation. Saratov: KUBiK 2019 LLC. P. 18-21.

8. **Pavlov M.V., Karpov D.F.** Solution of the boundary value problem of heat and mass transfer by the source method for conditions of radiant soil heating // Prirodoobustrojstvo. 2023. № 4. P. 15-20. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-4-15-20.

9. **Pavlov M.V., Karpov D.F.** Solution of the boundary value problem of heat and mass transfer by the method of finite integral Fourier transform for conditions of radiant soil heating. Prirodoobustrojstvo. 2024. № 1. P. 18-24. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-1-18-24.

10. **Pavlov M.V., Karpov D.F.** Solution of the boundary value problem of heat and mass transfer by the method of joint application of the integral Laplace transform and the Bubnov-Galerkin variational method for conditions of radiant soil heating. Prirodoobustrojstvo. 2024. № 3. P. 21-30. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-3-21-30>

11. **Pavlov M.V., Karpov D.F., Sinitsyn A.A., et al.** Study of heat and mass transfer processes in the soil layer on the example of milled peat at infrared radiant heating: a textbook. Vologda: VoGU, 2015. 192 p.

#### Author information

**Mikhail V. Pavlov**, CSe(Eng), associate professor of the Department of Heat and Gas Supply; Author ID SCOPUS: 57204361039; WoS ResearcherID: AAN-5773-2021; ORCID: 0000-0002-8687-3296; RSCI ID: 564419; SPIN code: 6544-7267; pavlo-vmv@vogu35.ru

**Denis F. Karpov**, senior lecturer department of Heat and Gas Supply; Author ID SCOPUS: 57210325021; Was ResearcherID: AAF-2092-2021; ORCID: 0000-0002-3522-9302; RSCI ID: 564418; SPIN code: 9241-4996; karpovdf@vogu35.ru

Pavlov M.V. and Karpov D.F. conducted theoretical and experimental studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, have copyright on the article and are responsible for plagiarism.