

УДК 631.544.41:631.172

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУХООБМЕНА В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ТЕПЛИЦЕ С ВОЗДУШНО- КОНВЕКТИВНЫМ ОТОПЛЕНИЕМ НА НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

В.В. КЛИМОВ

(Кафедра овощеводства)

Рассматриваются результаты исследований воздухообмена в экспериментальной теплице с воздушно-конвективной системой обогрева при различных способах распределения подогретого воздуха.

Приводятся данные о кратностях воздухообмена при распределении подогретого воздуха при помощи воздуховодов с верхней и нижней перфорацией, а также при сосредоточенном выпуске воздуха в зависимости от метеорологических условий.

Данные исследований могут быть использованы при проектировании систем отопления теплиц на низкопотенциальных вторичных энергоресурсах.

Одним из технических решений для теплиц при использовании низкопотенциальных вторичных энергоресурсов (ВЭР) является применение воздушно-конвективных установок (ВКУ) с развитой поверхностью теплообмена и большими массами рециркулирующего воздуха. Практическое применение нашли 2 способа распределения воздуха: транспортировка его при помощи перфорированных воздуховодов и установка перегородок, разделяющих теплицу на отдельные секции.

Первый способ более технологичен с точки зрения агротехники, в

этом случае скорости воздушного потока в зоне растений не превышают 0,3—0,5 м/с. Второй способ проще в технологическом отношении, не требует применения высоконапорных вентиляторов, однако скорости воздушного потока возрастают до 0,5—1,0 м/с.

Как правило, при использовании в теплицах воздуховодов, направляющих теплый воздух в зону растений, осложняется процесс освобождения кровли от снега при интенсивных снегопадах, т.е. замедляется его таяние. В связи с этим представляется интерес такое конструктивное

решение воздуховодов, при котором воздушный поток омывает поверхность кровли, обеспечивая таяние выпадающего снега.

При всех способах применения ВКУ существенным образом изменяется характер теплообмена и особенно воздухообмена в теплице. Исследования, проведенные ранее, подтвердили зависимость воздухообмена от конструктивного исполнения как самих теплиц, так и систем отопления [7, 8, 10]. Например, в теплице с водовоздушным экраном в связи с интенсивным воздухообменом значительно повышается относительная влажность воздуха [4, 10]. Достоверная информация о характере воздухообмена необходима при расчетах систем отопления, подкормки углекислым газом, увлажнения и испарительного охлаждения.

На практике воздухообмен учитывается косвенным образом в виде надбавок к теплопотерям теплицы на инфильтрацию [13]:

$$g_{\text{инф}} = a(\gamma_n - \gamma_{\text{ин}})q_{\text{опр}}, \text{ Вт/м}^2\text{°C}, (1)$$

где  $q_{\text{инф}}$  — теплопотери вследствие инфильтрации наружного воздуха, Вт/м<sup>2</sup> °C;  $a$  — коэффициент, равный для остекленных теплиц 1, пленочных — 0,8;  $\gamma_n, \gamma_{\text{ин}}$  — объемная масса наружного и внутреннего воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $q_{\text{опр}}$  — расчетные теплопотери теплицы через ограждающие поверхности, Вт/м<sup>2</sup>°C.

Согласно экспериментальным полученным данным теплопотери за счет инфильтрации могут достигать 30—50% общего расхода тепла [15, 21].

В связи с этим весьма актуально определение интенсивности воздухообмена в теплицах, использующих

вторичные энергоресурсы, с помощью воздушно-конвективных установок.

### Методика

Исследования проводились в экспериментальной теплице лаборатории овощеводства площадью 450 м<sup>2</sup>, оборудованной системами воздушного отопления в 1990 г. Использовались 3 схемы распределения теплого воздуха: 1 — воздуховоды с перфорацией, направленной вниз; 2 — воздуховоды с перфорацией, направленной вверх; 3 — средоточенный выпуск воздуха.

В основу исследований положен комбинированный принцип оценки воздухообмена, поскольку чисто расчетные методы, описанные в работах [20, 22], недостаточно точны и слишком громоздки. Комбинированный метод достаточно полно изложен в работе И.А. Иоффе [5]. Он заключается в определении кратности воздухообмена антракометрическим способом с последующим расчетом показателя воздухообмена  $j$  по конструктивным характеристикам теплицы и климатическим параметрам.

В классических исследованиях воздухообмена промышленных зданий, определяемого гравитационным и ветровым факторами, принимают три основных допущения {1, 2, 9}: 1) процессы фильтрации стационарны во времени; 2) температура в объеме сооружения одинакова, а давление изменяется по закону гидростатики; 3) неплотности равномерно распределены по его площади.

Порядок определения аэродинамических характеристик теплицы следующий. Вначале находят крат-

ность воздухообмена, используя дифференциальное уравнение вентиляции

$$N = \frac{1}{(\tau - \tau_0)} \ln \frac{(C_0 - C_n)}{(C - C_n)}, \quad (2)$$

где  $N$  — кратность воздухообмена, ч<sup>-1</sup>;  $C_0, C$  — концентрация газа в объеме в начальное и конечное время эксперимента, %;  $C_n$  — концентрация газа в наружном воздухе, %;  $\tau_0, \tau$  — начало и конец эксперимента, ч.

Для определения  $N$  в теплицах чаще всего используют углекислый газ. Вычислив кратность воздухообмена, находят количество инфильтрующегося воздуха:

$$G = \gamma VN, \quad (3)$$

где  $G$  — количество инфильтрующегося воздуха, кг/ч;  $\gamma$  — объемная масса воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  — объем теплицы, м<sup>3</sup>.

На этом этапе натурные исследования заканчиваются и начинается расчет показателя воздухообмена, который определяется из уравнения

$$G = j \int P^n dF_u, \quad (4)$$

где  $G$  — количество инфильтрующегося воздуха, кг/ч;  $j$  — коэффициент воздухопроницаемости, кг/м<sup>2</sup> · ч;  $P$  — избыточное давление в теплице, мм вод. ст.;  $n$  — показатель степени, зависящий от характера движения воздуха через неплотности;  $F_u$  — поверхность инфильтрации, м<sup>2</sup>.

Исследованию характера движения воздуха через неплотности посвящены две работы [3, 14], в которых рассмотрена зависимость расхода воздуха от избыточного давле-

ния. В результате было установлено, что

$$n = 0,5 + 1,2/j. \quad (5)$$

Так как  $j$  для промышленных теплиц обычно составляет более 20—25, то  $n$  можно принять равным 0,5.

Однако для выполнения практических расчетов необходима линейаризация параболы  $jP^n$  прямой  $j_1P$  в интервале  $0 — P_m$  ( $P_m$  — максимальное избыточное давление). Коэффициент линейаризации определяется по методу среднего арифметического приближения, при котором выполняются условия:

$$\int_0^{P_m} (jP^n - j_1P) dP = 0, \quad (6)$$

откуда

$$j_1 = \frac{2j}{n+1} P_m^{n-1} \quad (7)$$

или при  $n = 0,5$

$$j_1 = \frac{1,33j}{\sqrt{P_m}} = kj. \quad (8)$$

Максимальное избыточное давление определяется по уравнению

$$P_m = Z_0 \Delta\gamma + (K_n - K_\alpha) P_d \quad (9)$$

где  $Z_0$  — высота нейтральной температурной линии, разделяющей зоны инфильтрации и эксфильтрации, м;  $\Delta\gamma$  — разность объемных масс наружного и внутреннего воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $K_n, K_\alpha$  — аэродинамические коэффициенты на наветренной стороне и внутри теплицы;  $P_d$  — динамическое давление ветра, мм вод. ст.

Динамическое давление ветра находим по формуле

$$P_d = \frac{\gamma_n v^2}{2g}, \quad (10)$$

где  $\gamma_n$  — объемная масса наружного воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  — скорость ветра, м/с;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Аэродинамические коэффициенты зависят от конструкции сооружений и направления воздушного потока, внешние аэродинамические коэффициенты могут быть приняты по результатам исследований Э.И. Реттера [11, 12].

При направлении ветра вдоль конка теплицы:

а) на наветренной боковой стороне —  $K_n = 0,6$ ;

б) на заветренной боковой стороне —  $K_z = 0,3$ ;

в) поверхность кровли и торцевых стен может иметь переднюю, сред-

нюю и заднюю зоны. В области передней зоны, длина которой  $S_n$  равна

$$S_n = 1,8\sqrt{LH}, \quad (11)$$

где  $L$  и  $H$  — ширина и высота теплицы, м, аэродинамические коэффициенты распределяются по зависимости

$$K_{n(Y)} = \frac{0,63}{0,35 + Y/\sqrt{LH}}, \quad (12)$$

где  $Y$  — текущая координата поверхности от наветренного торца по направлению ветра, м.

Для средней и задней зоны значения аэродинамических коэффициентов могут быть приняты равными

$$K_0 = K_s = -0,3.$$

Внутренний аэродинамический коэффициент находится по формуле [5]:

$$K_0 = \frac{(K_n - K_z)LH_{cp} + K_z L_x (S - S_n) - 0,63 L_x S_n}{2LH_{cp} + L_x S}, \quad (13)$$

где  $H$  — средняя высота теплицы, м;  $H_{cp} = H_0 + h/2$  ( $H_0$  — высота бокового ограждения,  $h$  — высота от конка до стены);  $L_x = L \cos \beta$  ( $\beta$  — угол наклона кровли), м.

При направлении ветра перпендикулярно коньку теплицы значения наружных аэродинамических коэффициентов следующие:

а) на наветренной стороне —  $K_n = 0,6$ ;

б) на заветренной стороне —  $K_z = 0,24$ ;

в) на торцевых стенах —  $K_r = 0,2$ ;

г) распределение аэродинами-

ческих коэффициентов по поверхности кровли описывается формулой

$$K_{кр(x)} = -\frac{1}{9} \left( \frac{\sqrt{SH_x}}{x} + 6 \frac{h}{l} + 1 \right), \quad (14)$$

где  $H_x$  — полная высота теплицы (с учетом цоколя), м;  $h$  — высота подкровельного пространства, м;  $l$  — ширина одной секции теплицы, м.

Внутренний аэродинамический коэффициент определяется по формуле

$$K_{90} = \frac{2K_m LH_{cp} + (K_u + K_z)HS - b(L-l/2)S_x - BS_x \ln 2m}{2LH + 2H_0S + (L-l/2)S_x}, \quad (15)$$

где  $b = \frac{1}{9} \left( 6 \frac{h}{1} + 1 \right)$ ;  $B = \frac{1}{9} \sqrt{SH_x}$ ;  $S_x = \frac{S}{\cos \beta}$ ;

наимический коэффициент определяется так:

$$K_\alpha = K_0 \cos^2 \alpha + K_{90} \sin^2 \alpha. \quad (16)$$

$m$  — число секций.

При произвольном направлении скорости ветра внутренний аэроди-

Положение нейтральной температурной линии вычисляется по формуле (5):

$$Z_0 = \frac{H_0 + (r_1 H + r_2) \cdot (H^2 - H_0^2) - 2/3 r_1 (H^3 - H_0^3)}{2H_0 + h(r_1 h + 2r_2)}, \quad (17)$$

где  $r_1 = \frac{4m}{R \operatorname{tg} \beta}$ ;  $r_2 = \frac{2mS}{R \sin \beta}$ ;  $R$  — пери-

метр теплицы, м.

На следующем этапе работы необ-

ходимо рассчитать результирующие температурные и ветровые инфильтрационные поверхности. Они определяются на основании следующих зависимостей [5]:

$$F_{um} = \frac{R}{2} Z_0^2 \quad (18)$$

(при  $Z_0 \leq H_0$ ),

$$F_{um} = m(H - Z_0)^2 \left( \frac{2}{3} \frac{H - Z_0}{\operatorname{tg} \beta} + \frac{S}{\sin \beta} \right) \quad (19)$$

(при  $Z_0 > H_0$ ),

$$F_{us} = L_x \sqrt{LH_x} \left[ 0,63 \left( \ln \frac{1,8}{-K_0} - 1 \right) - 0,35K_0 \right] \quad (20)$$

(при  $\alpha = 0$ )

$$F_{us} = S_x \left[ B \ln \left( \frac{2x_0}{l} + (K_{90} + b) \left( x_0 \frac{l}{2} \right) \right) \right], \quad (21)$$

где  $x_0 = -\frac{B}{K_{90} + b}$

(при  $\alpha = 90$ ).

При промежуточных значениях направления ветра используют формулу (16).

После линеаризации и интегрирования уравнения (4) получим следующую зависимость:

$$G_u = Kj(\Delta\gamma F_{ит} + PdF_{ис}), \quad (22)$$

где  $K$  — коэффициент зависимости  $j$  от  $j_1$ .

Тогда, зная по экспериментальным данным  $g_u$  и рассчитав характеристики теплицы  $F_{ит}$  и  $F_{ис}$  и метеорологические параметры  $\Delta\gamma$  и  $P_d$ , определяем показатель воздухообмена

$$j = \frac{G_u}{k(\Delta\gamma F_{ит} + P_d F_{ис})}. \quad (23)$$

### Результаты

Вначале определяем расчетные характеристики теплицы, размеры которой представлены на рисунке.

1. Положение нейтральной температурной линии по формуле (17)

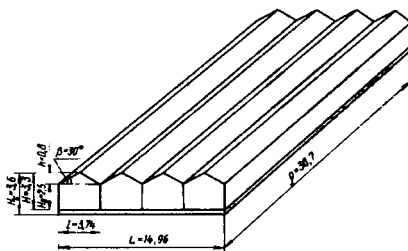


Схема экспериментальной теплицы.

$$Z_0 = 2,16 \text{ м.}$$

2. Аэродинамические коэффициенты по формулам (13), (15), (16):

$$K_0 = -0,34,$$

$$K_{90} = -0,31,$$

$$K_{45} = -0,32.$$

3. Поверхности инфильтрации по формулам (16), (18), (20), (21):

$$F_{ит} = 207,1 \text{ м}^2,$$

$$F_{ис}^{\alpha=0} = 76,8 \text{ м}^2 \text{ при } \alpha = 0,$$

$$F_{ис}^{\alpha=90} = 74,45 \text{ м}^2 \text{ при } \alpha = 90^\circ,$$

$$F_{ис}^{\alpha=45} = 75,62 \text{ м}^2 \text{ при } \alpha = 45^\circ.$$

Результаты натурных исследований воздухообмена при различных схемах распределения воздуха представлены в табл. 1—3.

Т а б л и ц а 1

#### Кратность воздухообмена и коэффициент воздухопроницаемости

Дата	$\Delta T, \text{C}$	$v, \text{м/с}$	$\alpha, ^\circ$	$N, \text{ч}^{-1}$	$j, \text{кг/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{мм вод. ст.}$
<i>Воздуховоды с перфорацией, направленной вниз</i>					
2.03	19,7	3	45	1,81	35,77
2.03	19,69	3	45	1,83	36,15
2.03	20,89	3	45	1,86	39,23
2.03	21,82	3	45	1,83	38,41
11.03	18,44	1	45	1,11	38,80
11.03	19,51	0	0	1,02	39,22
12.03	21,62	1	45	1,16	38,42
12.03	22,2	1,5	45	1,52	38,83
13.03	24,25	2	45	1,51	39,22
13.03	21,27	2	45	1,44	38,42
14.03	24,6	1,6	45	1,39	38,84
15.03	24,77	2	0	1,52	39,22
Среднее	21,51	1,92		1,50	38,38

Дата	$\Delta T, C$	$v, м/с$	$\alpha, ^\circ$	$N, ч^{-1}$	$j, кг/м^2 \cdot ч \cdot мм вод. ст.$
<i>Воздуховоды с перфорацией, направленной вверх</i>					
13.02	16,05	3	45	1,85	38,42
14.02	16,45	2,4	45	1,61	38,82
14.02	17,00	7	45	3,88	39,24
15.02	15,3	9	45	4,97	39,62
16.02	18,8	6	45	3,42	40,03
16.02	19,3	5,3	0	3,13	40,43
17.02	19,9	6	90	3,51	40,79
20.02	16,3	2	45	1,63	43,66
21.02	20,00	3	45	2,1	41,58
22.02	12,0	5	45	2,88	40,56
23.02	12,6	1,6	45	1,35	42,67
1.03	19,1	1,6	90	1,51	43,00
Среднее	16,9	4,07		2,65	40,73
<i>Сосредоточенный выпуск</i>					
7.02	21,5	2	45	1,61	42,05
8.02	20,2	2	45	1,56	38,83
8.02	21,0	2	45	1,65	43,17
8.02	15,0	4,7	45	2,90	41,05
9.02	15,0	4,0	45	2,67	43,40
9.02	12,7	3,0	45	1,85	38,73
9.02	15,1	2,2	45	1,64	41,23
10.02	17,5	2	45	1,72	44,09
10.02	16,8	2	45	1,60	42,02
10.02	16,2	2	45	1,50	39,64
11.02	15,3	2	45	1,48	39,26
Средние значения	16,81	2,68		1,91	41,28

Для кратности воздухообмена получены следующие зависимости от разности температур и скорости ветра:

1.  $N = 0,833 + 0,0048 \Delta T + 0,295 V \pm 0,079$ ,  $K$  корреляции — 0,97, коэффициенты частного определения — 0,0035 и 0,938.

2.  $N = 0,343 + 0,015 \Delta T + 0,476 V \pm 0,099$ ,  $K$  корреляции — 0,998, коэффициенты частного определения — 0,038 и 0,99.

3.  $N = 0,133 + 0,023 \Delta T + 0,514 V \pm 0,08$ ,  $K$  корреляции — 0,98, коэффициенты частного определения — 0,05 и 1,026.

По этим зависимостям рассчитаны кратности воздухообмена для средних многолетних данных за отопительный сезон и для расчетных суток зимнего периода для условий Москвы [16, 17].

Расчетные климатические параметры приведены в табл. 2, а результаты расчетов кратности воздухообмена теплицы с воздушным отоплением — в табл. 3.

Т а б л и ц а 2

**Расчетные параметры климата**

Параметр	За отопительный период	Для расчетных суток
t воздуха в теплице, °С	22	15
t наружного воздуха, °С	—3,7	—32
Скорость ветра, м/с	3,83	4,9

Т а б л и ц а 3

**Зависимость кратности воздухообмена от способов распределения воздуха и климатических факторов**

Вариант опыта	За отопительный период		Для расчетных суток	
	ч <sup>-1</sup>	%	ч <sup>-1</sup>	%
1	2,09	100	2,50	100
2	2,56	122	3,39	136
3	2,70	129	3,75	150

В результате исследований установлено, что воздухообмен в теплице существенным образом увеличивается при направлении воздушного потока непосредственно в подкровельное пространство. При этом воздухообмен возрастает на 22 за отопительный сезон и 36% для расчетных зимних суток в случае воздухопроводов с перфорацией, направленной вверх, и соответственно на 29 и 50% при сосредоточенном выпуске воздуха.

Коэффициент воздухопроницаемости при направлении воздушного

потока на кровлю увеличивается на 6,12%, при сосредоточенной раздаче воздуха на 7,56% по сравнению с этим показателем в варианте традиционной подачи воздуха в зону растений.

Следует отметить идентичность результатов расчетов и опытных данных, полученных в аналогичных экспериментах. Так, в опытах А. Гака [18] коэффициент воздухопроницаемости для блочной теплицы типа Венблок был равен 35,2% при среднеквадратичном отклонении 8,0 и коэффициенте вариации



22,8%, в другой серии опытов [19] — соответственно 36,1%, 2,24 и 6,24%.

В исследованиях И.А. Иоффе и Л.Н. Абросимовой [20] значения коэффициента воздухопроницаемости колебались от 30,7 до 36,8 при средних 34,6 для теплицы блочного типа площадью 1 га (температура в теплице 21,8...24,4°C, наружного воздуха —8,0...3,3°C, скорость ветра 2,2—5,3 м/с) [6].

### Выводы

1. При распределении воздуха с помощью перфорированных воздухопроводов и направлении воздушного потока в зону растений коэффициент воздухопроницаемости теплицы может быть принят аналогичным значениям этого показателя блочных теплиц с водотрубной системой отопления.

2. При направлении воздушного потока из воздухопроводов на кровлю коэффициент воздухопроницаемости увеличивается на 6,12%, а при сосредоточенном выпуске воздуха — на 7,56%.

3. Кратность воздухообмена в теплице с направлением воздушного потока из воздухопроводов на кровлю повышается на 22% в целом за отопительный сезон и на 36% для расчетных зимних суток.

4. При сосредоточенном выпуске воздуха кратность воздухообмена на 29 и 50% выше, чем при воздуховодах с перфорацией, направленной в зону растений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Батурин В.В., Эльтерман В.М. Аэрация промышленных зданий. М.: Госстройиздат, 1963. — 2. Бун-

кин К.А., Черемухин А.М. Давление ветра на крыши и стены зданий. — Тр. ЦАГИ, 1928, вып. 35. — 3. Васильев В.Ф. Натурные исследования температурно-влажностного режима жилых зданий. — М.: Стройиздат, 1957. — 4. Иоффе И.А., Рожанская О.В. О зависимости относительной влажности воздуха в теплице от условий внешней среды (ночной режим). — В сб.: Микроклимат культивационных сооружений в условиях Нечерноземной зоны. Л.: Гидрометиздат, 1976, вып. 36, с. 17—22. — 5. Иоффе И.А. К аэродинамическому анализу фильтрации воздуха в культивационных сооружениях и методике ее расчета. — В сб.: Микроклимат культивационных сооружений в условиях Нечерноземной зоны. Л.: Гидрометиздат, 1976, вып. 36, с. 23—48. — 6. Иоффе И.А., Абросимова Л.Н. Экспериментальное исследование коэффициента обмена и расчет воздухопроницаемости ограждения блочной одногектарной теплицы. — В сб.: Микроклимат культивационных сооружений в условиях Нечерноземной зоны. Л.: Гидрометиздат, 1976, вып. 36, с. 49—50. — 7. Климов В.В. Исследование естественного воздухообмена в экспериментальной теплице с водонаполненной кровлей. — Изв. ТСХА, 1976, вып. 5, с. 220—226. — 8. Климов В.В., Кудряшов Ю.С., Иванов В.И. Исследование воздухообмена в однослойной пленочной теплице. — Изв. ТСХА, 1971, вып. 4, с. 227—231. — 9. Максимов Г.Г. Учет воздухопроницаемости зданий при газификации. Л.: Недра, 1968. — 10. Отчет о научно-исследовательской работе за 1982 г. по теме «Испытание теплицы с водовоздушным экраном». — М.:

- ТСХА, 1982. — 11. *Петтер Э.И.* Аэродинамическая характеристика промышленных зданий. — Челябинск, 1959. — 12. *Петтер Э.И., Стриженов С.И.* Аэродинамика зданий. М.: Стройиздат, 1968. — 13. Руководство по теплотехническому расчету культивационных сооружений. Орел: Гипронисельпром, 1982. — 14. *Семенова В.И.* Воздухопроницаемость окон жилых и общественных зданий. М.: Стройиздат, 1969. — 15. *Сивашинский И.И., Ануфриев Л.Н.* Исследование теплотерьер в пленочной теплице типа «Латвия» вследствие инфильтрации наружного воздуха. — В сб. молодых ученых и аспирантов НИИОХ. М., 1968, с. 412—423. — 16. СНиП 2.01.01—82. Строительная климатология и геофизика / Госстрой СССР. М.: Стройиздат, 1983. — 17. Справочник по климату СССР. Вып. 8. Л.: Гидрометиздат, 1967. — 18. *Gac A., Jacquot M., Mangnen Y. et al.* — Bull. Techn. Genie Rural., 1966, № 80. — 19. *Gac A., Jacquot M., Chomont J. et al.* — Bull. Techn. Genie Rural., 1969, № 95. — 20. *Heller T.* — Heizung-Zuftung-Haustechik, 1957, Bd 8, № 8, S. 201—204. — 21. *Heissner A.* — Archiv fur Gartenban, 1967, Bd 15, H. 8, S. 521—532. — 22. *Mierzwinski S.* — Gas, woda i technika Sanitarna, 1964, № 1, S. 29—34.

*Статья поступила 21 сентября 1993 г.*

## SUMMARY

Results of investigations of air exchange in experimental greenhouse with air-convective heating system with different ways of distributing the heated air are discussed. The data are presented about air exchange ratio with distribution of the heated air by means of air ducts with upper and low perforation, as well as with concentrated air discharge depending on meteorological conditions.

Results of the investigations may be used in designing the heating systems for greenhouses on low-potential secondary power resources.