



Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
Башкирский государственный аграрный университет

Кафедра «Теплоэнергетики и физики»

**Б1.В.01. Современные проблемы теплоэнергетики,  
теплотехники и теплотехнологий**

**МЕТОДИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ**  
к выполнению расчетно-графической работы

Направление подготовки  
13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Квалификация (степень) выпускника  
магистр

Уфа 2023

Методическое указание разработано профессором, докт. техн. наук Ф. З. Габдрафиковым.

Рассмотрены и одобрены на заседании кафедры «Теплоэнергетика и физика» (протокол №7 от 23 марта 2023 г. ) и методической комиссией энергетического факультета(протокол №8 от 23 марта 2023 г.).

Ответственный за выпуск: и.о. зав.кафедрой  
Д.Д.Харисов

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1	Общие положения	4
2	Системы отопления и обогрева	8
3	Задание на расчетно-графическую работу	11
4	Расчет тепловой мощности системы отопления	13
5	Расчет поверхности нагрева и подбор отопительных приборов	17
6	Аэродинамический расчет воздухораспределительной сети	23
	Библиографический список	31

## 1 Общие положения

Защищенным грунтом называют земельные участки, имеющие укрытия и оборудованные инженерными сооружениями, для создания искусственного микроклимата при всесезонном выращивании растений. К сооружениям защищенного грунта относят теплицы (остекленные и с полимерным покрытием) пленочные укрытия, оранжереи, парники и шампиньонницы.

По назначению теплицы подразделяются на овощные, рассадноовощные, цветочные, цитрусовые; по периоду эксплуатации - на зимние и весенние; по способу выращивания - почвенные, гидропонные и аэропонные.

Остекленные теплицы и теплицы с полимерным покрытием конструктивно выполняются либо многопролетными (блочными), либо однопролетными (ангарными).

Блочная (от английского block) — совокупность, объединение) теплица представляет собой объединение нескольких двускатных звеньев (секций) под одной кровлей (рисунок 1 а,б).

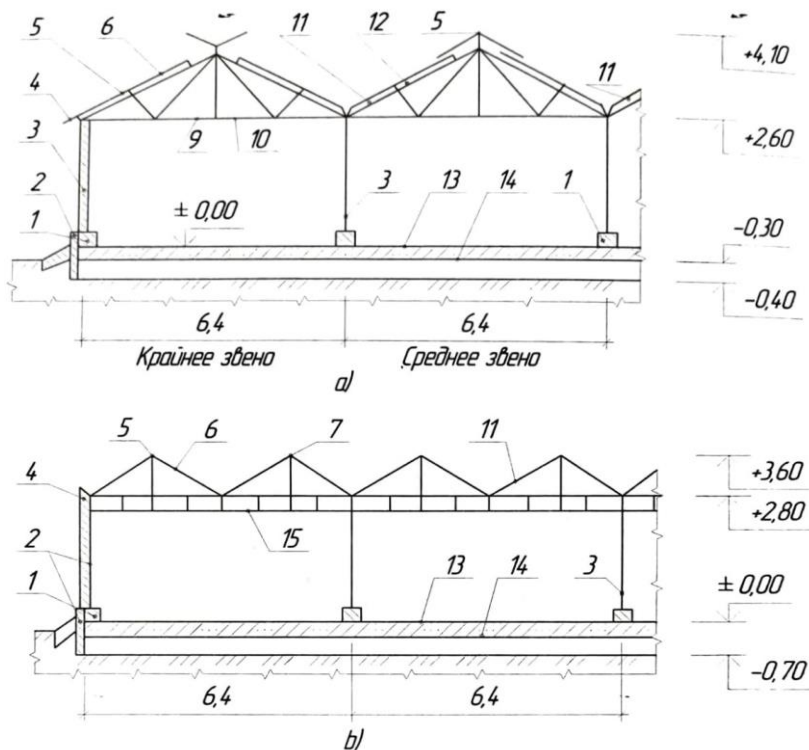
Зимние остекленные теплицы строят, как правило, шириной пролета 6,4м одноконьковые (рисунок 1а) или двухкровельная с подстропильной фермой с шириной пролета внизу 6,4 м, а по кровле 3,2 м (рисунок 1б). Высота цоколя теплицы, как правило, равна 0,3 м; высота фронтона кровли 0,7...0,8 м; высота стоек - 2,4 или 2,7 м. Площадь одной блочной теплицы

промышленного типа не менее 1,0 га и не более 3,0 га. На рисунке 2 показан план блока зимних теплиц.

В нашей стране достаточно широкое распространение получили остекленные зимние и пленочные теплицы ангарного типа. Ангарные теплицы строятся однопролетными с полусферической (арочной) или двускатной кровлей, не имеющей внутренних стоек. Они имеют ширину от 12 до 30 метров, длину до 100 метров, высоту в коньке до 8 метров.

Площадь одной ангарной теплицы составляет 600...3000 м<sup>2</sup>. На рисунке 3 показан поперечный разрез и план ангарной теплицы.

При учебных заведениях, в небольших фермерских и подсобных хозяйствах предприятий, в лечебных учреждениях строят двускатные стеклянные теплицы (рисунок 4) шириной 8 м, оптимальной длиной 25...50 м, высотой в коньке 3,28 м, карнизе - 1,36 м, инвентарной площадью 200...400 м<sup>2</sup>



**Рисунок 1** Схематичные разрезы блочных теплиц заводского изготовления (размеры дан в метрах): а) блочной рамной конструкции; б) то же с подстропильной фермой; 1 – фундамент; 2 – цоколь; 3 – стойки; 4 – карниз; 5 – прогоны; 6 – шпрсы с остеклением; 7 – форточки; 8 – затяжки; 9 – подвески; 10 – раскосы; 11 – лотки; 12 – ригель; 13 – грунт; 14 – дренажное устройство; 15 – ферма

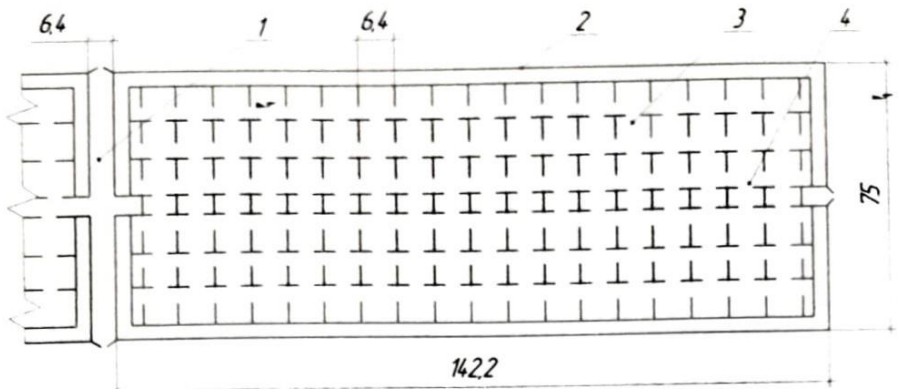
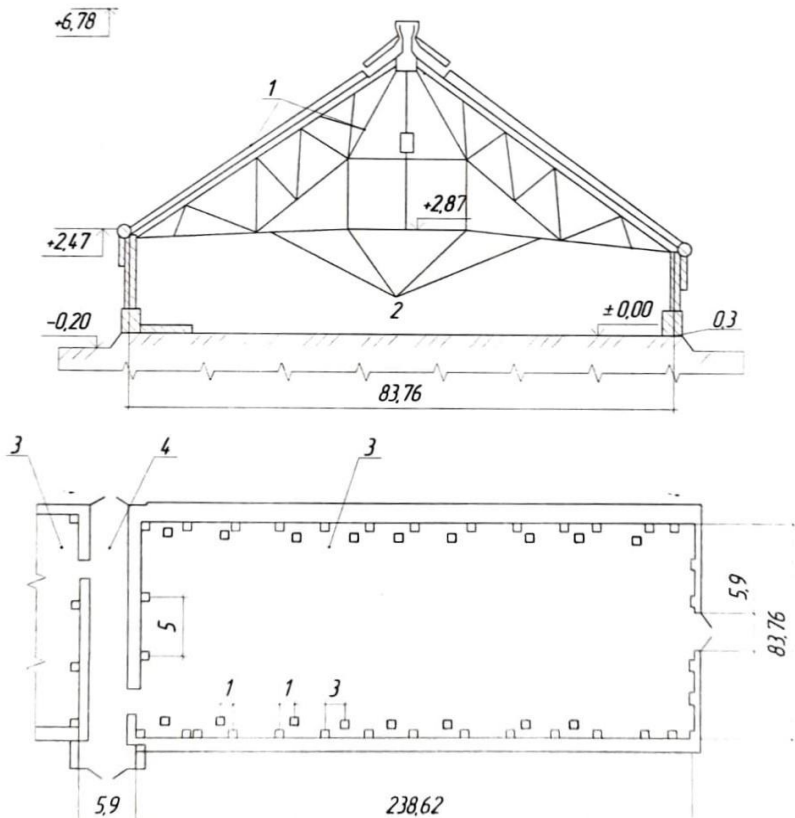
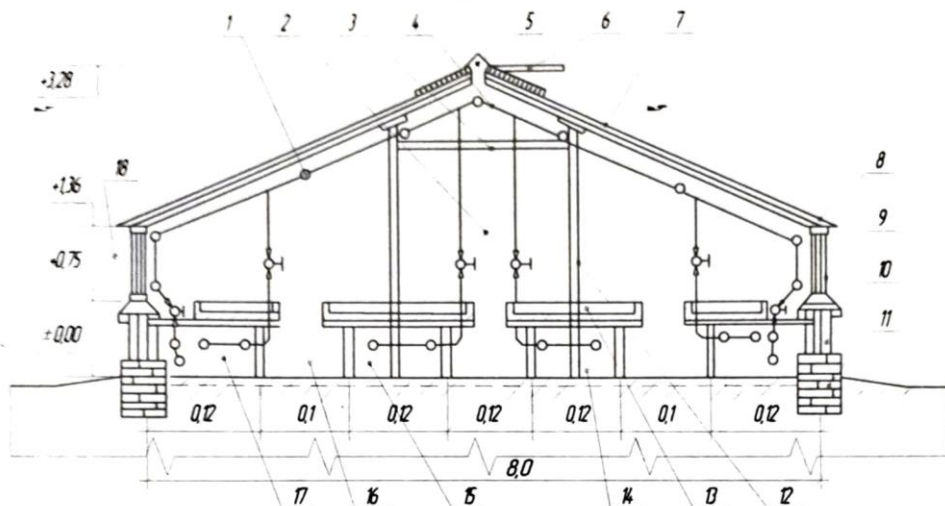


Рисунок 2 План зимней блочной теплицы (размеры даны в метрах): 1 - соединительный коридор; 2 - стена; 3 - стойки; 4- асфальтированная дорожка



**Рисунок 3 Поперечный разрез и план зимней ангарной теплицы (размеры даны в метрах) 1 – проволока; 2 – канат; 3 – теплица; 4 – соединительный коридор**



**Рисунок 4 Поперечный разрез зимней двускатной стеллажной почвенной теплицы (размеры даны в метрах): 1 – труба водяного отопления шатра; 2 – шатер; 3 – ригель; 4 – конек; 5 – коньковый прогон; 6 – фрамуга; 7 – кровельное остекленное ограждение; 8 – карниз; 9,18 – стеклянная часть боковой стены с фрамугами; 10 – кокошь; 11 – фундамент; 12 – стойка; 13 – стеллаж; 14 – подстеллажный грунт; 15 – труба подстеллажного обогрева; 16 – проход; 17 – труба цокольного обогрева**

## 2 Системы обогрева и отопления

При выборе системы обогрева или отопления теплиц исходят из оптимальных параметров температур в зоне роста растений. Так расчетная температура воздуха в культивационном сооружении в ночное время при выращивании овощей и рассады составляет  $15^{\circ}\text{C}$ , рассады открытого грунта  $8^{\circ}\text{C}$ . Температура грунта в корнеобитаемом слое в течение суток долж-

на быть не ниже  $18^{\circ}\text{C}$  и не выше  $25^{\circ}\text{C}$ . Кроме того, система отопления должна обладать малой инерционностью для автоматизации системы обогрева.

Наибольшее применение на практике в настоящее время находят следующие технические виды отопления.

Водяной обогрев (рисунок 5) применяется в основном в зимних теплицах

для обогрева почвы и воздуха одновременно и состоит из подсистем:

- шатрового обогрева (для таяния снега и поддержания требуемого температурного режима в верхней зоне);

- цокольного обогрева (для локализации холодных потоков в пристенной зоне);

- контурно-подпочвенного обогрева (для предотвращения промерзания почвы в пристенной зоне);

- надпочвенного обогрева (для обеспечения равномерности температуры в надпочвенной зоне);

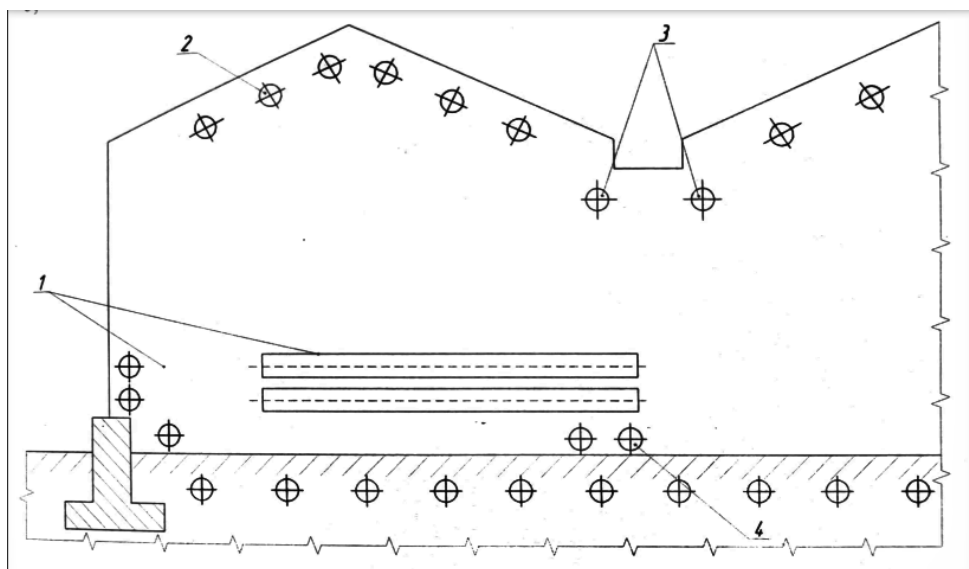
- основного подпочвенного обогрева (для создания температурного режима в корнеобитаемом слое).

Для обогрева воздуха используют стальные или стеклянные трубы, а для обогрева грунта — трубы из полиэтилена низкого давления (температура воды не выше  $45^{\circ}\text{C}$ ), при температуре теплоносителя до  $60^{\circ}\text{C}$  - трубы из полипропилена.

Для шатрового, цокольного и надпочвенного обогрева температура горячего теплоносителя должна быть  $t=150, 130$  или  $95^{\circ}\text{C}$ , обратной воды  $t_h=70^{\circ}\text{C}$ , для почвенного обогрева  $t_h=45^{\circ}\text{C}$  и  $t_h=30^{\circ}\text{C}$ . Подпочвенный контурный обогрев работает на обратной воде с температурой  $70^{\circ}\text{C}$ . Схема движения воды при водяном отоплении показано на рисунке 6.

В верхней зоне теплиц трубы обогрева размещают под покрытием, водосточными лотками и карнизами, в средней зоне - у наружных стен и на внутренних стойках каркаса, в

нижней зоне по контуру наружных стен на глубине 0,05...0,1 м для обогрева почвы — на глубине не менее 0,4 м.



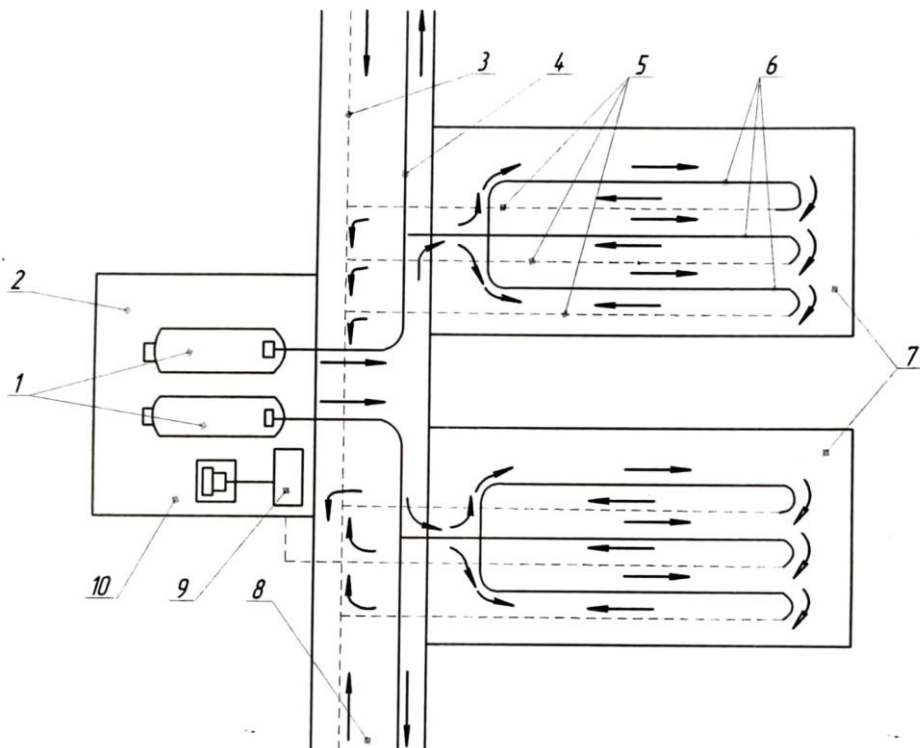
**Рисунок 5** Схема системы водяного отопления теплицы: 1 – цокольный обогрев; 2 – шатровый обогрев; 3 – лотковый обогрев; 4 – надпочвенный обогрев; 5 – подпочвенный обогрев; 6 – контурно-подпочвенный обогрев

Разводку трубопроводов систем отопления чаще всего выполняют в виде регистров.

Для избегания образования воздушных пробок трубу укладывают с уклоном 0,002...0,003.

Наиболее широкое распространение при обогреве зимних теплиц получила комбинированная система отопления, представляющая собой сочетание водяного трубного с воздушно-калориферным отоплением. Суммарная поверхность нагревательных приборов в этом случае уменьшается на 30...35%, так расчет ведут на повышенную, на 10°C температуру, а дополнительная пиковая тепловая нагрузка до 30...40% покрывается за счет работы калориферов. Кроме того, применение калориферов улучшает условие воздухообмена в теплицах и дает возможность авто-

матически регулировать температурный режим. Принципиальная схема комбинированной системы обогрева приведена на рисунке 6.



**Рисунок 6** Схема движения теплоносителя при водяном отоплении теплиц:

1 – водогрейный котлы; 2 – котельная; 3 – обратные магистрали; 4 – подающие магистрали; 5 – обогревательные трубы с охлажденной водой; 6 – обогревательные трубы с горячей водой; 7 – теплица; 8 – соединительный коридор; 9 – насос; 10 – мотор

Воздушный обогрев применяется в теплицах с пленочным покрытием с помощью пароводяных и электрических калориферов, газовых отопительно-вентиляционных агрегатов, теплогенераторов, воздухоподогревателей.

### 3 Задание на расчетно-графическую работу

по теме “Проектирование систем отопления и вентиляции сооружений защитного грунта”

Таблица 1 Место расположения объекта и климатические данные

Предпоследняя цифра номера зачетной книжки	Место расположения объекта	Зимняя овощная теплица			Весенняя рассадная теплица		
		Наружная расчетная температура $t_{н,р,з}$ , °С	Скорость ветра $u$ , м/с	Относительная влажность воздуха $\varphi$ , %	Наружная расчетная температура $t_{н,р,з}$ , °С	Скорость ветра $u$ , м/с	Относительная влажность $\varphi$ , %
1	2	3	4	5	6	7	8
0	Акъяр	-34	6,0	78	-10	4,3	80
1	Бирск	-36	7,0	79	-11	4,2	81
2	Белорецк	-36	5,6	76	-13	3,5	78
3	Магнитогорск	-35	8,1	78	-12	4,0	80
4	Бугульма	-34	7,5	85	-10	3,8	88
5	Дуван	-37	5,1	77	-14	3,6	79
6	Мелеуз	-35	5,0	78	-7	3,8	80
7	Стерлитамак	-37	5,2	79	-7	3,9	81
8	Уфа	-36	5,5	82	-8	4,9	85
9	Янаул	-38	7,6	82	-8	3,6	85

Таблица 2 Вид назначение, инвентарная площадь, тип покрытия теплицы, расчетные параметры внутреннего воздуха и теплоносителя

Предпоследняя цифра номера зачетной книжки	Тип теплицы	Назначение теплицы	Инвентарная площадь $A_{инв}$ , м <sup>2</sup>	Виды покрытия	Расчетные параметры		Виды теплоносителя	Параметры теплоносителя		
					$t_v$ , °С	$\varphi$ , %		$t_r$ , °С	$t_o$ , °С	$t_{воз}$ , °С

1	I	Зимняя овощная	21609	Стекло $\delta_{ст}=3,0$ мм	15	60	Вода и воздух	150	70	50
2	II	Зимняя овощная	10560	Стекло $\delta_{ст}=3,0$ мм	15	70	Вода и воздух	95	70	50
3	III	Весенняя овощная	10200	Пленка полиэтиленовая	8	65	Воздух			50
4	IV	Весенняя рассадно-овощная	5280	Пленка полиэтиленовая в 2 слоя	15	75	Вода и воздух	45	30	50
5	V	Зимняя овощная	15000	Стекло $\delta_{ст}=3,0$ мм	15	80	Вода и воздух	150	70	55
6	VI	Зимняя овощная	1000	Стекло $\delta_{ст}=2,5$ мм	15	60	Вода и воздух	95	70	50
7	VII	Весенняя рассадно-овощная	750	Пленка полиэтиленовая в 2 слоя	8	65	Вода и воздух	40	30	50
8	VIII	Весенняя рассадно-овощная	1505	Пленка полиэтиленовая в 2 слоя	8	60	Воздух			60
9	IX	Зимняя овощная	200	Стекло $\delta_{ст}=3,0$ мм	15	70	Вода и воздух	95	70	55
0	X	Зимняя овощная	300	Стекло $\delta_{ст}=3,0$ мм	15	75	Вода и воздух	150	70	50

**Таблица 3 Принятые к расчету типоразмеры теплиц**

Тип	Конструкция теплицы	Ширина	Высота		Длина теплицы $l, м$	Ширина теплицы $B, м$	Цоколь				
							$h_{ц}, м$	$\delta_{ц}, м$	$\lambda$	$K_{ц}$	

			Конька $h_k$ , м	Корниза $h_{кар}$ , м					$\frac{Вт}{м \cdot К}$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$
I	блочная	6,4	4,7	2,60	70,4	75,0	0,3	0,38	-	1,55
II	блочная	6,4	4,10	2,60	140,8	75,0	0,3	0,51	-	1,23
III	блочная	3,2	3,60	2,80	70,4	75,0	0,3	0,64	-	1,03
IV	блочная	4,0	3,90	2,40	152,0	68,0	0,3	0,35	1,63	-
V	ангарная	18	6,78	2,47	90,0	18,0	0,3	0,64	-	1,03
VI	ангарная	24	6,8	2,20	72,0	24,0	0,3	0,51	-	1,23
VII	ангарная	9,0	3,20	2,40	54,0	9,0	0,3	0,4	1,45	-
VIII	ангарная	24	3,90	2,80	48,0	24,0	0,3	0,3	1,63	
IX	Двухскатная стеллажная	8,0	3,28	1,36	136,0	8,0	0,75	0,35	1,136	-
X	Двухскатная стеллажная	8,0	3,28	1,36	24,0	8,0	0,75	0,4	1,45	-

#### 4 Расчет тепловой мощности системы отопления

В соответствии с руководством по техническому расчету культивационных сооружений расчет тепловой мощности защищенного грунта (Вт) рассчитывают для ночного режима в предположении, что растения в теплице отсутствуют, то есть принимается худший вариант по температурному режиму.

Уравнение теплового баланса в этом случае имеет вид:

$$\Phi_{от} + \Phi_p = \Phi_{огр} + \Phi_{гр} + \Phi_{вен} + \Phi_{и}, \quad (1)$$

где  $\Phi_{от}$  - тепловая мощность системы отопления, Вт;

$\Phi_p$  - тепловой поток солнечной радиации, Вт;

$\Phi_p=0$  для отапливаемых сооружений защищенного грунта;

$\Phi_{огр}$  - поток теплоты теряемой через ограждение, Вт;

$\Phi_{гр}$  - поток теплоты теряемой через грунт (почву), Вт;

Фвен - поток теплоты теряемой через вентиляцию, Вт;

Фи. - поток теплоты, расходуемый на испарение влаги из почвы, Вт.

Поток теплоты теряемой через ограждение:

$$\Phi_{огр} = K \cdot A \cdot (t_v - t_{н.р}) \cdot K_v \cdot K_{инф} \cdot K_{с.с} \cdot K_{вл}, \quad (2)$$

где K – коэффициент теплопередачи через светопрозрачное покрытие, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

A - Площадь светопрозрачного ограждения, м<sup>2</sup>;

t<sub>v</sub> - расчетная температура воздуха внутри сооружения, °С;

t<sub>н.р.</sub> - расчетная температура наружного воздуха, °С;

K<sub>v</sub> - коэффициент учитывающий увеличение теплопотерь при скорости ветра свыше 2,3 м/с;

K<sub>инф</sub> - коэффициент учитывающий увеличение теплопотерь на нагрев инфильтрующегося воздуха, K<sub>инф</sub>=1,3;

K<sub>с.с.</sub> - коэффициент учитывающий увеличение теплопотерь от расположения ограждений относительно сторон света, K<sub>с.с</sub>=1,0...1,1;

K<sub>вл</sub> - коэффициент учитывающий увеличение теплопотерь от относительной влажности воздуха, K<sub>вл</sub>=1,02...1,05.

Коэффициент учитывающий увеличение теплопотерь при скорости ветра определяется:

$$K_v = 0,775 + 0,1015 \cdot u, \quad (3)$$

где u — скорость ветра, м/с.

**Таблица 4** Значение коэффициента теплопередачи через светопрозрачное покрытие

Вид покрытия	K, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
стекло в один слой металлическими шпросами	6,4
стекло в два слоя с металлическими шпросами	3,3
стекло в один слой с деревянными шпросами	5,8
стекло в два слоя, разделенных промежутков	3,5
полиэтиленовая пленка, покрытая слоем конденсата	7,6
полиэтиленовая пленка в два слоя, разделенных воздушным промежутком 40 мм со слоем конденсата	14,7
сухая ординарная полиэтиленовая пленка	
сухая полиэтиленовая пленка в два слоя, разделенная воздушным промежутком 40 мм	10,0
	5,8

Расчетная наружная температура для зимних теплиц равна средней наиболее холодных суток, а для весенних теплиц н.р. равна средней температуре наиболее холодного месяца из периода эксплуатации, сниженной на половину суточной амплитуды колебания температуры наружного воздуха (определяется по климатологическому справочнику). В теплицах для вы-

ращивания овощных культур и рассады  $t_v=15^{\circ}\text{C}$ , а в теплицах для выращивания рассады для открытого грунта  $t_{н.р}=12^{\circ}\text{C}$ .

Поток теплоты, теряемый через систему вентиляции, определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{вен.}} = 0,278 \cdot V \cdot K \cdot \rho \cdot c \cdot (t_v - t_{н.р}) \quad (4)$$

где  $V$  – внутренний объем сооружений,  $\text{м}^3$ ;  
 $\rho$  – плотность наружного воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $c=1 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  – удельная теплоемкость воздуха;  
 $K$  – кратность воздухообмена.

При водяном обогреве вентиляция теплиц в зимний период осуществляется только за счет инфильтрации и учтено при расчете  $\Phi_{\text{огр.}}$ , а при воздушном и комбинированном способах обогрева кратность воздухообмена не превышает 1...2,5.

При затруднении в оценке значения воздухообмена можно пользоваться приближенным соотношением  $\Phi_{\text{вен.}} = 0,15 \cdot \Phi_{\text{огр.}}$  для теплиц.

Потери теплоты в окружающий грунт можно определить 2 способами.

Первый способ:

$$\Phi_{\text{гр.}} = \sum A_i \frac{\lambda_i}{\delta_i} (t_{\text{в.гр.}} - t_{\text{н.гр.}}) \quad (5)$$

где  $A_i, \lambda_i, \delta_i$  – соответственно площадь ( $\text{м}^2$ ), теплопроводность  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , толщина ( $\text{м}$ ) отдельных участков культивационного сооружения, соприкасающегося с окружающим грунтом;  
 $t_{\text{в.гр.}}$  – температура грунта внутри теплицы на глубине расположения нагревательных труб,  $t_{\text{в.гр.}}=18^{\circ}\text{C}$ ;  
 $t_{\text{н.гр.}}$  – температура наружного грунта принимаемая равным  $t_{\text{н.р.}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ .

Теплопотери через грунт можно рассчитать по уравнению теплопередачи для полов, расположенных на грунте с разбивкой площади теплицы на 4 зоны, из которых первые 3 считая от цоколя внутренней поверхности, имеют ширину 2 метра каждая по контуру теплицы, а оставшаяся внутренняя часть составляет четвертую зону.

Коэффициенты теплопередачи для каждой принимаются равным

$$(\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})): K_1=0,45; K_2=0,233; K_3=0,116; K_4=0,07.$$

Площадь четвертой зоны в расчетах принимается в 4...5 раз меньше фактической.

Второй способ определения потерь теплоты в окружающий грунт:

$$\Phi_{\text{гр.}} = \sum A_i \cdot K_i \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{н.п}}), \quad (6)$$

где  $A_i$  – площадь рассчитываемой зоны,  $\text{м}^2$ ;

$K_i$  – коэффициент рассчитываемой зоны,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

Тепловой поток через цоколь  $\Phi_{\text{ц}}$  рассчитывают по формуле:

$$\Phi_{\text{ц}} = K_{\text{ц}} \cdot A_{\text{ц}} \cdot (t_{\text{в.н}} - t_{\text{н.п}}) \cdot K_{\text{в}} \cdot K_{\text{с.с}} \cdot K_{\text{в.л}}, \quad (7)$$

Где  $K_{\text{ц}}$  – коэффициент теплопередачи через цоколь,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

Высота цоколя принимается 0,3 м, а толщина при кирпичной кладке может быть 0,38 м (1,5 кирпича) с  $K_{\text{ц}}=1,55 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Если цоколь изготовлен из бетона или железобетона, то  $K_{\text{ц}}$  необходимо вычислить по формуле:

$$K_{\text{ц}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \frac{\delta_{\text{и}}}{\lambda_{\text{и}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}}}, \quad (8)$$

где  $\alpha_{\text{вн}} = 8,75 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  – коэффициент теплопередачи от внутреннего воздуха к поверхности цоколя;

$\alpha_{\text{вн}}$  – коэффициент теплопередачи от наружной поверхности цоколя к воздуху,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$$\alpha_{\text{н}} = 5,8 + 11,63\sqrt{u}, \quad (9)$$

Теплопроводность бетона  $\lambda_{\delta} = 7,45 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , железобетона  $\lambda_{\text{ж.б}} = 1,63 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Толщина цоколя  $\delta_{\text{ц}}$  принимается в пределах 0,3. ..0,4 м.

Тепловой поток на испарение влаги, уносимый из культивируемого сооружения с вентилируемым воздухом, приблизительно можно рассчитать по формуле:

$$\Phi_{\text{и}} = 0,278 \cdot r \cdot V \cdot \rho_{\text{в}} \cdot (d_{\text{в}} - d_{\text{н}}) \cdot K, \quad (10)$$

где  $r = 2500 \text{ кДж}/\text{кг}$  – удельная теплота парообразования в атмосферных условиях;

$\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха при температуре  $t_{\text{в}}$ , принимается по таблице физических свойств воздуха  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$d_v$  и  $d_n$  – соответственно, влагосодержание внутреннего и наружного воздуха, кг пара/кг сухого воздуха. (определяется по H,d – диаграмме влажного воздуха).

При отсутствии обогрева почвы, то есть когда сооружение оборудовано только системой воздушного отопления, учитывают тепловой поток, обусловленный аккумуляцией теплоты в почве за день:

$$\Phi_{ак} = 0,00545 \cdot A_o \cdot \sqrt{\lambda_n \cdot c_n \cdot \rho_n}, \quad (11)$$

где  $A_r$  – суточная амплитуда температуры на поверхности почвы, принимают равной суточной амплитуде температуры наружного воздуха, °С;

$\lambda_n$  – теплопроводность почвы Вт/(м·К);

$c_n$  – удельная теплоемкость почвы, Дж/(кг·К);

$\rho_n$  – оптимальная плотность почвы кг/м<sup>3</sup>.

Теплофизические характеристики почвы принимаются по таблице 5 в зависимости от состава, плотности и влажности почвы.

## 5 Расчет поверхности нагрева и подбор отопительных приборов

Определив из уравнения теплового баланса (1) значение мощности системы отопления  $\Phi_{от}$  делят его в определенном соотношениями между системами подпочвенного  $\Phi_{п}$ , и воздушного  $\Phi_v$  обогрева в зависимости от расчетной температуры наружного воздуха и коэффициента ограждения  $K_{огр} = A_{общ}/A_{огр}$ , представляющий собой отношение общей площади ограждения ( $A_{общ}$ , м<sup>2</sup>) к инвентарной площади сооружения ( $A_{инв}$ , м<sup>2</sup>).

Для парников  $K_{огр}=1,0$  для стеклянных блочных теплиц  $K_{огр}=1,25$ , для ангарных стеклянных  $K_{огр} = 1,4$ , соответственно для пленочных  $K_{огр}=1,5$  и  $K=1,3$ .

Основной задачей при расчете подпочвенного обогрева является определение температуры почвы в корнеобитаемом слое на глубине 0,2 м, которая должна быть не ниже 18°С и не выше 25°С. Из соотношения  $\Phi_{п}/\Phi_v$  определяют по известной величине  $\Phi_{от}$ , тепловой поток подпочвенного обогрева  $\Phi_{п}$ .

В качестве теплопроводов для горячего теплоносителя и обратной воды принимают асбестоцементные ( $d_{вн}/d_{н}=100/122; 150/168$  мм,  $\lambda_{асб.}=0,52$  Вт/(м·К) или же полиэтиленовые трубы ( $d_{вн}/d_{н}=101,4/110; 97,4/110; 90/110$  мм,  $\lambda_{пол.}=0,384$  Вт/(м·К)) одинакового диаметра. Для каждого агрегата группы рекомендуется устраивать свою автономную систему обогрева почвы, применяя попутно - тупиковые регистры из 3 или 4 греющих труб.

**Таблица 5 Теплофизические характеристики тепличных почв и их зависимости от плотности**

Компоненты почвы, %				Влажность почвы $\omega, \%$						
Торф	Опилки	Земля	Навоз	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	40		50		60	
					$\lambda$ ,	C,	$\lambda$ ,	C,	$\lambda$ ,	C,
					$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
80	-	-	20	280	0,13	2,5	0,19	3,21	0,22	0,28
				350	0,27	2,28	0,34	2,97	0,40	4,40
				470	0,31	1,98	0,39	2,55	0,45	3,42
80	20	-	-	370	0,15	2,46	0,20	2,92	0,25	3,24
				490	0,25	2,60	0,32	3,02	0,47	3,94
				650	0,43	2,49	0,56	2,92	0,68	3,38
60	20	10	10	250	0,08	2,56	0,09	2,88	0,12	3,32
				350	0,13	2,46	0,15	2,86	0,19	3,28
				420	0,20	2,52	0,25	2,93	0,37	3,33
40	20	20	20	450	0,30	2,53	0,35	2,98	0,45	3,42
				600	0,48	2,50	0,53	2,40	0,65	3,33
				800	0,81	2,42	0,90	2,87	0,96	3,26
20	-	60	20	620	0,52	2,42	0,58	2,82	-	-
				1000	0,90	2,34	0,92	2,72	-	-
				1200	1,2	2,38	1,2	2,82	-	-

Если длина участка до 30 м, то систему обогрева целесообразно выполнить замкнутыми регистрами, устанавливая аг-

регаты с одной стороны, а если длина участка более 30 м, то встречными регистрами с двух сторон. Глубину заложения труб принимают  $h=0,4\dots0,5$  м, шаг заложения  $b=0,4\dots1,6$  м.

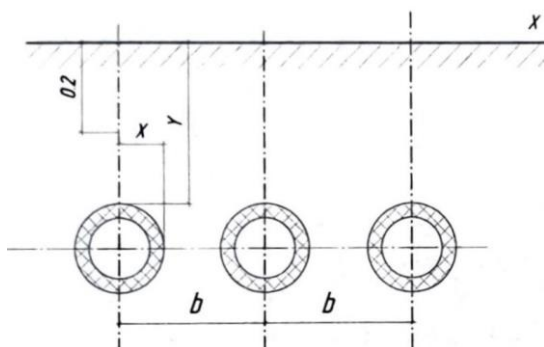
Тепловой поток, поступающий на обогрев почвы при многотрубном теплопроводе (рисунок 7) проводят с учётом дополнительного термического сопротивления:

$$R_{\text{доп.}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{гр.}}} \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot h}{b}\right)^2}, \quad (12)$$

где  $b$  - шаг заложения теплопроводов, м.

**Таблица 6 Соотношения между тепловой мощностью системы подпочвенного и воздушного обогрева культивационных сооружений**

$K_{\text{огр.}}$	Значения $\Phi_{\text{п}}/\Phi_{\text{в}}$ при ( $t_{\text{н}}, ^\circ\text{C}$ )		
	-20	-30	-40
1,0	0,60	0,52	0,47
1,25	0,50	0,43	0,38
1,30	0,48	0,41	0,36
1,40	0,44	0,38	0,33
1,50	0,40	0,35	0,31



**Таблица 7 Расчетная схема к определению температуры в слое почвы на глубине 0,2 м**

Определяют тепловые потоки от подающего  $q_{/1}$  и обратного  $q_{/2}$  теплопроводов, Вт/м:

$$q_{/1} = \frac{(t - t_{\text{гр.}}) \cdot R_2 - (t_0 - t_{\text{гр.}}) \cdot R_{\text{доп.}}}{R_1 \cdot R_2 - R_{\text{доп.}}^2}, \quad (13)$$

$$q/2 = \frac{(t_o - t_{гр.}) \cdot R_1 - (t_r - t_{гр.}) \cdot R_{доп.}}{R_1 \cdot R_2 - R_{доп.}^2}, \quad (14)$$

где  $R_1 = R_2 = R_{тр.} + R_{гр.} + R_{доп.}$  – суммарное термическое сопротивление,  $(м^2 \cdot К)/Вт$ ;

$t_{гр.}$  – температура грунта на глубине заложения труб  $t_{гр.} = 18...25^{\circ}C$ .

Термическое сопротивление грунта  $R_{гр.}$  определяется по формуле:

$$R_{гр.} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{гр.}} \cdot \ln \left( \frac{2 \cdot h}{d_H} + \sqrt{\left( \frac{2 \cdot h}{d_H} \right)^2 - 1} \right) \quad (15)$$

Термическое сопротивление трубы  $R_{тр.}$  :

$$R_{тр.} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{гр.}} \cdot \ln \frac{d_H}{d_{вн.}}, \quad (16)$$

где  $\lambda_{гр.}$  – теплопроводность трубы,  $Вт/(м \cdot К)$ .

Зная  $q/1$  и  $q/2$  можно подсчитать температуру вокруг трубы по формуле:

$$t = t_{гр.} + \frac{q/1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{гр.}} \cdot \ln \sqrt{\frac{(0.2+h)^2}{(0.2-h)^2}} + \frac{q/2}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{гр.}} \ln \sqrt{\frac{(x-b)^2 + (y+h)^2}{(x-b)^2 + (y-h)^2}}, \quad (17)$$

где  $x$  и  $y$  – координаты рассчитываемой точки, м.

При  $x=0$  и  $y=0,2$  м формула упрощается и принимает вид:

$$t = t_{гр.} + \frac{q/1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{гр.}} \cdot \ln \sqrt{\frac{(0.2+h)^2}{(0.2-h)^2}} + \frac{q/2}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{гр.}} \ln \sqrt{\frac{b^2 + (0.2+h)^2}{b^2 + (0.2-h)^2}}, \quad (18)$$

Если температура на глубине 0,2 м вычисленная по формуле (18), окажется выше  $25^{\circ}C$ , то необходимо изменить либо шаг заложения трубопровода  $b$ , либо глубину заложения  $h$  и провести повторный расчет.

Необходимая длина труб для подпочвенного обогрева определяется по формуле:

$$l_{\text{тр.}} = \frac{\Phi_{\text{п}}}{q_{/1} + q_{/2}} \quad (19)$$

При комбинированном отоплении теплицы рекомендуется принимать 25...35% от мощности системы отопления с  $\Phi$ . на воздушно-калориферное отопление и 65...75% - на систему водяного (парового) отопления. Суммарную площадь поверхности нагрева системы отопления воздушного пространства теплицы, геометрические размеры и число нагревательных труб определяют, используя расчетный материал главы 1 /6/.

При применении комбинированной системы отопления культивационных сооружений отопительно-вентиляционными агрегатами или теплогенераторами их тип выбирают по таблице 4.5 /6/ и по таблице 4/5/, а число определяют по формуле:

$$n = \frac{\Phi_{\text{в.о.}}}{q_a}, \quad (20)$$

где  $\Phi_{\text{в.о.}}$  - тепловая мощность воздушно-калориферного отопления, кВт;

$q_a$  - тепловая мощность одного агрегата, кВт.

Если при воздушном отоплении применяется рассредоточенная раздача воздуха, то для этой цели используют бесшовные полиэтиленовые трубы с толщиной стенок 0,006...0,010 м. Отверстия для выхода воздуха делают с двух сторон трубы на равном расстоянии друг от друга, а сами трубы устанавливают на опоры вблизи от поверхности почвы.

Методика расчета тонкостенных, равномерно перфорированных труб постоянного сечения с заглушенным концом разработана Д.А. Куртнером и А.Ф. Чудновским в предположении, что параметры внутреннего воздуха в помещении постоянные, теплоемкость и плотность теплоносителя не изменяются по всей длине воздуховода.

Теплоотдача перфорированной трубы складывается из количества теплоты,

уходящей с воздухом через боковые отверстия и теплопередачи через ее стенки.

Расход воздуха в м<sup>3</sup>/ч через начальное сечение трубы равно:

$$V_1 = \frac{3,6 \cdot \Phi_T}{c_B \cdot \rho_B \cdot \Delta t}, \quad (21)$$

Где  $\Phi_T$  - теплоотдача расчетная перфорированной трубы или тепловая мощность одной калориферной установки, Вт;

$c_B$  – удельная массовая изобарная теплоемкость воздуха, равная 1,0 кДж/(кг·К);

$\rho_B$  – плотность воздуха при температуре выхода из калорифера, °С (в начальном сечении трубы);

$\Delta t = 0,8 \cdot t_B$  – перепад температуры в начальном сечении трубы, °С;

0,8 – коэффициент запаса;

$t_{доп.}$  – длительно допустимая температура воздуха внутри культивационного сооружения, °С.

Диаметр трубы определяют по формуле:

$$d_{тр.} = \sqrt{\frac{4 \cdot V_t}{\pi \cdot u_o \cdot 3600}}, \quad (22)$$

Где  $u_o$  – средняя скорость воздуха в начальном сечении трубы (10...15 м/с).

Относительную величину площади боковых отверстий  $A_{отн.}$ , то есть суммарную площадь боковых отверстий отнесенную к площади сечения трубы, находят по графику (рисунок 8) в зависимости от безразмерного параметра  $n$ :

$$n = \frac{\pi \cdot d_{тр.} \cdot l \cdot K}{c \cdot \rho_B \cdot V_t}, \quad (23)$$

где  $l$  - длина воздуховода, м;

$K$  - коэффициент теплопередачи через стенки трубы, равная для полиэтиленовых трубопроводов 7,1...8,0 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Число боковых отверстий в трубе  $m$  подсчитывают, предварительно задавшись их диаметром  $d_{отв.} = 0,01 \dots 0,025$  м:

$$m = A_{отн.} \left( \frac{d_{тр.}}{d_{отв.}} \right), \quad (24)$$

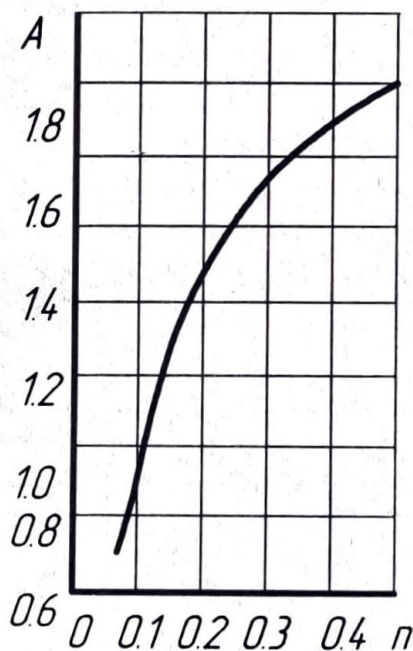


Рисунок 8 Зависимость  $A_{отн.}$  От  $n$

## 6 Аэродинамический расчет воздухораспределительной сети

Аэродинамический расчет систем вентиляции сводится к определению размеров поперечного сечения воздуховодов, а также потерь напора в отдельных участках и в системе в целом. При заданных размерах воздуховодов и известном перепаде давления в системе выполняется поверочный расчет по определению пропускной способности, как отдельных участков воздуховода, так и системы в целом.

Для аэродинамического расчета вычерчивают аксонометрическую схему системы вентиляции, на которой намечаются места установки вентиляционного оборудования и выде-

ляются фасонные части воздуховодов, как это показано на рисунке 9.

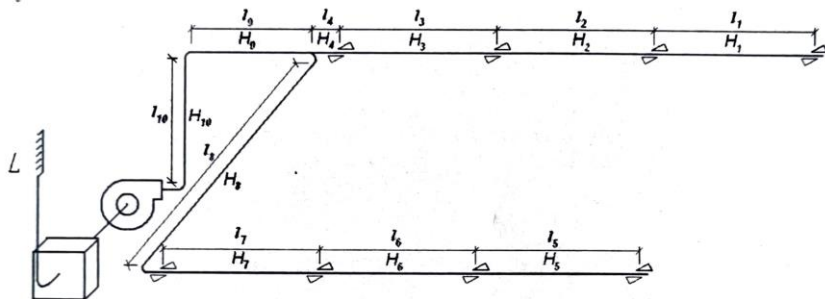


Рисунок 9 Расчетная схема системы вентиляции

По строительным планам определяют протяженность отдельных ветвей системы и наносят на аксонометрическую схему. Расчету предшествует составление воздушного баланса. По данным воздушного баланса на каждый участок аксонометрической схемы наносится расход воздуха. Все участки номеруются.

После такой подготовительной работы приступают к аэродинамическому расчету. Расчет начинается с наиболее протяженной ветви, а в ней с самого дальнего участка.

При расчете необходимо соблюдать следующие условия: скорости воздуха на участках должны более или менее плавно возрастать по мере приближения к вентилятору. Потери напора в последовательно расположенных участках складываются. Так, в левой ветви эти потери будут:

$$H = H_1 + H_2 + H_3, \quad (25)$$

где  $H_1, H_2, H_3$  - потери напора в соответствующих участках.

Разница в потере напора в параллельных участках и ветвях не должна превышать 10%, в противном случае на одной из них нужно изменить сечение одного или нескольких участков.

Фактическая скорость воздуха в м/с в воздуховоде определяется по формуле:

$$v = L_p / f_{\phi}, \quad (26)$$

где  $L_p$  – расчетный расход воздуха на участке, м<sup>3</sup>/с;

$f_{\phi}$  – фактическая площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>.

**Таблица 7 Рекомендуемые скорости движения воздуха на участках и в элементах вентиляционных систем**

Участки и элементы вентиляционных систем	Рекомендуемые скорости движения воздуха, м/с при способах побуждения движения	
	естественном	механическом
Жалюзи воздуховодов	0,5...1	4...6
Приточные шахты	1...2	4...6
Горизонтальные воздуховоды и сборные каналы	1...1,5	6...10
Вертикальные каналы	1...1,5	5...8
Приточные решетки у потолка	0,5...1	1...2,5
Вытяжные решетки	0,5...1	1...3
Вытяжные шахты	1,5...2	5...8

Безразмерный коэффициент трения в воздухе определяется:

$$\lambda_{тр.} = 0,11 \cdot \left( \frac{68}{Re} + \frac{K}{d} \right)^{0,25}, \quad (27)$$

где  $Re$  – число Рейнольдса;

$K$  – абсолютная шероховатость стенок воздуховодов, мм;

$d$  – эквивалентный диаметр сечения воздуховода, мм.

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\gamma}, \quad (28)$$

где  $\gamma$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с.

Удельная потеря напора на трение воздуховода в Па/м любого сечения определяется:

$$R_{mp} = \frac{\lambda_{mp}}{4 \cdot R} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (29)$$

где  $R$  – гидравлический радиус поперечного сечения воздуховода, м;

$\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>

Гидравлический радиус в м поперечного сечения воздухопровода, представляет собой отношение площади поперечного сечения  $A$  к его периметру  $\Pi$ ;

$$R=A/\Pi. \quad (30)$$

Для воздухопроводов круглого сечения:

$$R=d/4. \quad (31)$$

Для того, чтобы можно было воспользоваться этой формулой для расчета воздухопроводов любого сечения, введено понятие об эквивалентном диаметре – экв.

**Таблица 8 Абсолютная шероховатость  $K$  стенок воздухопроводов или различных материалов**

Материал стенок воздухопровода	$K$ , мм	Материал стенок воздухопровода	$K$ , мм
Листовая сталь	0,1	Штукатурка по стенке	10
Шлакогипсовые плиты	1,0	Асбоцементные плиты или трубы	0,11
Шлакобетонный плиты	1,5	Фанера	0,1...0,3
Винипласт	0,1	Латунь, стекло	0,0015...0,01
Кирпичная кладка (каналы в стенах)	5...10	Резиновые рукава	0,006...0,01

Для воздухопроводов прямоугольной формы:

$$d_{\text{ЭКВ}} = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b}, \quad (32)$$

где  $a, b$  – размеры воздухопровода, м.

Для воздухопроводов квадратного сечения;

$$d_{\text{ЭКВ}} = a. \quad (33)$$

Для воздуховодов любого сечения;

$$R = d_{\text{ЭКВ}}/4. \quad (34)$$

С аэродинамической точки зрения основной характеристикой местного сопротивления является коэффициент местного сопротивления  $\zeta$ .

Коэффициент местного сопротивления представляет собой отношение потерь напора воздуха в данном местном сопротивлении  $h_{\text{МС}}$  к динамическому давлению  $h_{\text{Д}}$ :

$$\zeta = h_{\text{МС}} / h_{\text{Д}}. \quad (35)$$

Для каждого вида местного сопротивления на участке по таблицам или графикам определяют коэффициент местного сопротивления  $\zeta_j$ . Под участком подразумевается такой участок воздухопровода, через который в единицу времени проходит одно и тоже количество воздуха. По  $\sum \zeta_j$  и динамическому давлению определяют потери напора в местных сопротивлениях на участке.

$$\sum h_{\text{МС}} = \sum \zeta_j \frac{\rho \cdot v^2}{2}. \quad (36)$$

**Таблица 9** Значение коэффициента местного сопротивления для диффузоров круглого сечения

$F/f$	$f/F$	Значение угла $\alpha$ в градусах				
		10	15	20	25	30
1,25	0,8	0,01	0,01	0,02	0,02	0,05
1,50	0,66	0,02	0,04	0,05	0,07	0,10
1,75	0,57	0,03	0,06	0,07	0,12	0,17
2,0	0,5	0,04	0,08	0,10	0,15	0,21
2,25	0,44	0,04	0,09	0,12	0,21	0,28
2,50	0,4	0,06	0,10	0,14	0,24	0,31

Коэффициент местного сопротивления отводов:

$$\zeta = c_1, c_2, c_3. \quad (37)$$

где  $c_1, c_2, c_3$  – коэффициент учитывающие:  $c_1$  – радиус поворота,  $c_2$  – угол поворота,  $c_3$  – форму сечения воздухопровода.

**Таблица 10** Значение коэффициентов  $c_1, c_2, c_3$  для отводов круглого и прямоугольного сечения

	$r/d$ или $r/b$			$\alpha^\circ$				$b/a$				
	1,0	1,5	2,0	30	40	60	90	0,5	0,6	1,0	1,5	2,0
$c_1$	0,25	0,175	0,15									
$c_2$	-	-	-	0,46	0,62	0,72	1,0					
$c_3$				-	-	-	-	1,5	1,3	1,0	0,7	0,48

Примечание:  $b$  – сторона воздуховода прямоугольного сечения в плоскости, которой происходит поворот.

Для колена круглого сечения  $\zeta = 1,1$ , прямоугольного –  $1,1 \cdot c_3$ .

Для отводов прямоугольного сечения радиус принимается равным стороне сечения воздуховода, в плоскости которого происходит поворот.

**Таблица 11** Значение коэффициента местного сопротивления при входе и выходе воздуховода

Виды местного сопротивления	Коэффициент местного сопротивления $\zeta$
Вход в жалюзийную решетку с поворотом потока	2,0
Вход в воздуховод, заделанный заподлицо в стенку	0,5
Вход в вытяжную шахту	1,0
Выход из цилиндрической насадки в атмосферу	2,0

Если окажется, что коэффициент местного сопротивления относится не к скорости на расчетном участке, то необходимо сделать перерасчет  $\zeta$ ;

$$\zeta_j = \zeta_T \left( \frac{v_T}{v} \right)^2, \quad (38)$$

где  $\zeta_T$  – табличное значение коэффициентов местного сопротивления;

$v_T$  – скорость воздуха, рекомендованная в таблицах для определения  $h_{мс}$ .

Это можно пояснить и следующим образом. Если на участке или на границе двух смежных участков происходит изменение скорости потока, что имеет место при перемене се-

чения воздуховода, то значение  $\zeta$  будет зависеть от того, для какого сечения взять динамическое давление - до или после местного сопротивления. Чтобы избежать ошибок, в этих случаях, необходимо указывать к какому сечению воздуховода относится коэффициент местного сопротивления. Если коэффициент местного сопротивления определен для меньшего сечения  $f$  со скоростью  $v_f$ , а его нужно отнести к большему сечению  $F$  со скоростью  $v_f$ , то для пересчета следует пользоваться формулой:

$$\zeta_F = \zeta_f \frac{F}{f} = \zeta_f \left( \frac{v_f}{v_F} \right)^2. \quad (39)$$

Для воздухопроводов круглого сечения:

$$\zeta_F = \zeta_f \left( \frac{d_f}{d_F} \right)^2. \quad (40)$$

Если же  $\zeta$  нужно от большего сечения  $(F, v_f)$  отнести к меньшему  $(f, v_f)$ , то будет обратная зависимость:

$$\zeta_f = \zeta_F \frac{f}{F} = \zeta_F \left( \frac{d_f}{d_F} \right) = \zeta_F \left( \frac{v_F}{v_f} \right)^2. \quad (41)$$

Здесь и во всех ниже приводимых формулах индекс  $f$  относится к меньшему сечению, а индекс  $F$  – к большему.

Все данные расчета потерь напора в воздуховоде сводим в таблицу 12.

**Таблица 12 Результаты расчета потерь напора в воздухораспределительной сети**

№ участка	Расход воздуха $L/\text{м}^3/\text{ч}^3$	Длина участка $l, \text{м}$	Диаметр воздуховода $d, \text{мм}$	Скорость воздуха $v, \text{м/с}$	Удельная погрешность напора $R_{гр}, \text{Па/м}$	Суммарная потеря напора $H, \text{Па}$	Суммарный коэффициент местных сопротивлений	Динамический напор $h_d, \text{Па}$	Потери напора в местных сопротивлениях $h_{мс}, \text{Па}$	Потеря напора на участке $H, \text{Па}$	Суммарный напор на участке $\Sigma H, \text{Па}$	Пересчитанный диаметр воздуховода $d, \text{мм}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
...	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Чтобы получить полные потери напора в системе вентиляции, необходимо выявить величину сопротивлений воздухозаборной шахты, приточной камеры, регулировочного жалюзийного клапана, приточной шахты и калорифера, установленного перед вентилятором.

Расчетный напор для вентилятора будет составлять:

$$H_p = H_{вс} + H_{наг}. \quad (42)$$

Если на всасывающей линии будет установлен воздухоочиститель, то потери напора значительно возрастут.

Вентилятор по напору нужно выбрать с запасом.

## Библиографический список

1. Драганов Б.Х., Кузнецов А.В., Рудобашта С.П. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. М.: Агропромиздат, 1990. - 463 с.
2. Драганов Б.Х., Ковалев С.А., Лазоренко В.А. и др. Курсовое проектирование по по теплотехнике и применению в сельском хозяйстве. – М.: Агропромиздат, 1991. - 176 с.
3. Захаров А.А. Практикум по применению теплоты и теплообеспыжению в сельском хозяйстве. - М.: Колос, 1995. – 176 с.
4. Рудобашта С.П., Сидоренко Ф.Р., Илюхин М.С. Проектирование систем отопления и вентиляции с применением ЭВМ. – М.: МНИСП, 1987. – 82 с.
5. Строй А. Ф. Теплообеспыжение и вентиляция сельскохозяйственных зданий и сооружений. - Киев: Высшая школа, 1983. – 215 с.
6. СНиП 11-180-75. Норма проектирования. Теплицы и парники.
7. Габдрафиков Ф.З.,Абраров М.А. Теплотехника.Практикум: учебное пособие/-Уфа:Башкирский ГАУ,2020.-160 с.
8. Габдрафиков Ф.З.Техническая термодинамика и основы теплообмена: учебное пособие/-Уфа: Башкирский ГАУ,2022.-240 с.