

УДК 631.544.41:631.172

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНЫХ ТЕПЛОПОТЕРЬ БЛОЧНЫХ ОСТЕКЛЕННЫХ ТЕПЛИЦ ОТ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩЕГО КОМПЛЕКСА

В.В. КЛИМОВ

(Лаборатория овощеводства)

Приводятся результаты исследований коэффициентов теплопередачи, кратности воздухообмена и удельных теплопотерь блочной теплицы при различных климатических параметрах. Рассматриваются зависимости энергетических показателей от метеорологических факторов, полученные методами статистического анализа.

Данные исследований, проводившихся с использованием многофункциональной информационной системы, позволяют уточнить некоторые энергетические характеристики сооружений защищенного грунта, что дает возможность более корректно применять их при проектировании и технико-экономическом обосновании строительства и реконструкции тепличных комплексов.

Производство овощных культур в теплицах всегда было сопряжено со значительным расходом энергоресурсов [10]. Чтобы снизить себестоимость овощей, получаемых из сооружений защищенного грунта, еще на стадии массового строительства теплиц предусматривалось введение льготного тарифа (50% от промышленного) на тепловую энергию [17]. Такая государственная политика сохраняется и в настоящее время. В 1996—1997 гг. тепличным комбинатам компенсиро-

валось до 30% производственных энергозатрат [16].

Однако опережающий рост цен на энергоносители постоянно увеличивает долю энергетических ресурсов в себестоимости овощей защищенного грунта. Так, в агрофирме «Белая Дача» доля тепловой энергии в себестоимости огурца поднялась с 23,20% в 1990 г. до 35,14% в 1991 г. и 46,84% в 1995 г. Аналогичный рост наблюдается и при производстве томата в продленном обороте соответственно на 21,38; 27,94 и 42,25%.

В этой связи еще более актуальными становятся вопросы прогнозирования расходов энергоресурсов и проектирования экономических систем отопления тепличных комплексов. Основную роль при этом играют точный расчет энергетических характеристик теплиц при расчетных климатических параметрах. Нельзя сказать, что этому вопросу уделялось недостаточно внимания. Исследованиям зависимости удельных теплопотерь теплиц, коэффициентов теплопередачи через ограждения и кратности воздухообмена от параметров наружного воздуха и конструкции системы отопления посвящено значительное число работ [1—21].

Однако большинство исследований посвящено частным вопросам теплопотерь в конкретных сооружениях и до настоящего времени отсутствует единый комплексный подход в оценке теплопотерь, что приводит к значительным расхождениям в определении теплотехнических характеристик сооружений при использовании данных различных авторов [8]. Наиболее серьезной работой в области методики определения и нормирования теплотехнических параметров теплиц является методика теплотехнического расчета культивационных сооружений, разработанная в институте Гипронисельпром [18]. Однако и в этой работе не учтен фактор влияния скорости ветра на кратность воздухообмена теплиц, что приводит к несколько заниженным показателям удельных теплопотерь.

Вместе с тем оснащение действу-

ющих тепличных комплексов современными средствами автоматического регулирования и регистрации технологических параметров на базе ЭВМ позволяет существенно образом облегчить и повысить точность определения теплотехнических характеристик. В 1991—1996 гг. такие исследования теплотехнических характеристик блочной остекленной теплицы, оснащенной информационно-управляющим комплексом на базе ЭВМ СМ-1634, были проведены на Овощной опытной станции Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева.

### Методика

Как известно, для определения удельных теплопотерь теплицы достаточно регистрировать количество подведенной к объекту тепловой энергии. Для определения коэффициента теплопередачи дополнительно фиксируются температуры воздуха снаружи и внутри помещения. Наиболее точным и практически выполнимым методом для оценки инфильтрации воздуха через неплотности (кратность воздухообмена) является антропометрический метод [2, 9]. Для определения регрессионной зависимости теплотехнических характеристик теплицы от внешних метеорологических факторов дополнительно регистрируются относительная влажность и скорость наружного воздуха, интенсивность солнечной радиации на открытой площадке и в теплице.

Комплексные исследования проводились в теплице площадью 6500 м<sup>2</sup>, оснащенной информаци-

онно-управляющим комплексом на базе ЭВМ СМ-1634. Назначение, состав и функциональные возможности комплекса подробно изложены в методических указаниях [14, 15].

Учебно-опытная теплица построена с использованием базового типового проекта 810-1-7.86 и оснащена технологическим оборудованием, предназначенным для промышленного выращивания овощных культур на грунте. Теплица состоит из 4 отделений площадью по 1440 м<sup>2</sup> с независимыми системами отопления и вентиляции. Системы отопления воздушного шатра — водяные трубные, расчетный температурный график теплоносителя — 95—70°С. Регулирование температурного режима происходит за счет изменения расхода теплоносителя при помощи 2-ходовых регулирующих клапанов с электромоторными исполнительными механизмами. Система вентиляции в каждом отделении теплицы состоит из 2 подсистем и представляет собой сплошной ряд фрамуг шириной 80 см, расположенных слева и справа от конька каждого пролета теплицы. Открывание и закрывание фрамуг осуществляется при помощи реечного механизма с червячным и цилиндрическими редукторами.

Система отопления почвы — единая и не имеет автономного регулирования в каждом отделении. В качестве теплоносителя используется вода с температурой 35—45°С.

Информационно-управляющий комплекс позволяет поддерживать в отделениях теплицы задан-

ный температурный и влажностный режимы воздуха в зависимости от интенсивности солнечной радиации с точностью до 1° и регистрировать с периодичностью 2 мин удельное потребление тепловой энергии по каждому отделению, температуру воздуха и почвы, влажность воздуха, температуру теплоносителя на входе и выходе из системы отопления в каждом отделении, температуру наружного воздуха, скорость ветра и интенсивность солнечной радиации.

Все технологические параметры регистрируются в памяти и оформляются в виде матрицы для последующего регрессионного анализа. Дополнительно к получаемой информации по составляющим теплового баланса периодически проводились тесты теплицы на воздухопроницаемость антракометрическим методом. Обработка экспериментальных данных проводилась с помощью пакета прикладных программ статистического анализа «STRAZ», разработанного на кафедре кибернетики МСХА.

Теплотехнические характеристики теплицы определяли следующим образом. Удельное теплопотребление (теплопотери) — непосредственно по данным регистрации потребления тепловой энергии. Обобщенный коэффициент теплопередачи (с учетом потерь через щели) рассчитывали по удельным теплопотерям и перепаду температур:

$$K = q / (T_{\text{вн}} - T_{\text{н}}), \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}), \quad (1)$$

где  $q$  — удельные теплопотери, Вт/м<sup>2</sup>;  $T_{\text{вн}}$ ,  $T_{\text{н}}$  — температуры воздуха в теплице и наружного.

Кратность воздухообмена рассчитывали по результатам измерения скорости падения концентрации диоксида углерода в течение суток:

$$N = \frac{1}{\tau - \tau_0} \cdot 1 \cdot \frac{C_0 - C_n}{C - C_n}, \text{ ч}^{-1} \quad (2)$$

где  $\tau_0, \tau$  — начало и окончание эксперимента, ч;  $C_0, C$  — концентрация диоксида углерода в объеме теплицы в начале и в конце эксперимента, %;  $C_n$  — концентрация диоксида углерода в наружном воздухе, %.

По известной кратности воздухообмена рассчитывали количество инфильтрующегося воздуха в теплице:

$$G = N\rho V/33600, \text{ кг/с}, \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха,  $\text{кг/м}^3$ ;  $V$  — объем теплицы,  $\text{м}^3$  ( $V = 4680 \text{ м}^3$ ).

Плотность воздуха в диапазоне относительной влажности 65—95% зависит в основном от температуры:

$$\rho = 1/(0,7738 + 0,003 T), \quad (4)$$

Далее рассчитывали удельные теплотери за счет инфильтрации:

$$q_{\text{инф}} = (GC_p \Delta T)/S_{\text{отр}} \cdot 10^4 - 3, \text{ Вт/м}^2 \quad (5)$$

где  $G$  — расход воздуха через щели,  $\text{кг/с}$ ;  $C_p$  — теплоемкость воздуха,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\Delta T$  — перепад температур воздуха снаружи и внутри теплицы,  $^\circ\text{C}$ ;  $S_{\text{отр}}$  — поверхность ограждения отделения теплицы,  $\text{м}^2$  ( $S_{\text{отр}} = 1793 \text{ м}^2$ ).

После определения инфильтрационных потерь тепловой энергии рассчитывали потери и коэф-

фициент теплопередачи через ограждение теплицы:

$$q_{\text{отр}} = q - q_{\text{инф}}, \text{ Вт/м}^2 \quad (6)$$

$$K_t = q_{\text{отр}}/\Delta T, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}).$$

Затем рассчитывали реальный и расчетный (по методике института Гипронисельпром) коэффициенты инфильтрации:

$$K_p = q/q_{\text{отр}}; \quad (7)$$

$$K_{\text{расч}} = 1 + (\rho_n - \rho_{\text{вн}}), \quad (8)$$

где  $\rho_n, \rho_{\text{вн}}$  — плотности наружного и внутреннего воздуха,  $\text{кг/м}^3$ .

В заключение определяли поправочный коэффициент на инфильтрационные потери тепловой энергии за счет ветрового фактора:

$$K_v = K_p/K_{\text{расч}}. \quad (9)$$

## Результаты

Результаты натурных исследований за 1991—1996 гг. параметров микроклимата и элемента теплого баланса в теплице представлены в табл. 1. Данные сгруппированы и размещены в порядке возрастания перепада температур  $\Delta T$ .

Экспериментальные данные получены в следующих диапазонах параметров микроклимата:  $T_n - 24,50$ — $7,64$   $^\circ\text{C}$ ;  $v - 0,4$ — $6,20$   $\text{м/с}$ ;  $T_{\text{вн}} - 13,60$ — $20,51$   $^\circ\text{C}$ .

Средние значения показателей за период наблюдений были следующие:  $T = 22,33$   $^\circ\text{C}$ ;  $N = 1,82$   $\text{ч}^{-1}$ ;  $q = 167,08$   $\text{Вт/м}^2$ ;  $q_{\text{инф}} = 36,32$   $\text{Вт/м}^2$ ;  $q_{\text{отр}} = 130,76$   $\text{Вт/м}^2$ .

Регрессионный анализ экспериментальных данных дал следую-

Результаты опытов по определению элементов теплового баланса  
в учебно-опытной теплице (ООС, 1991—1996 гг.)

$T_{\text{вн}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м/с}$	$N, \text{ч}^{-1}$	$q, \text{Вт/м}^2$	$q_{\text{инф}}, \text{Вт/м}^2$	$q_{\text{орг}}, \text{Вт/м}^2$
20,51	7,64	12,87	2,00	1,55	74,45	17,44	57,01
18,33	5,04	13,29	1,80	1,55	76,65	18,17	58,48
20,47	7,08	13,39	2,20	1,46	82,99	17,07	65,92
18,29	4,29	14,00	1,12	1,33	80,71	16,35	64,36
16,23	-0,37	16,60	2,47	2,36	125,21	32,91	92,30
17,64	0,38	17,24	2,60	1,72	123,56	26,15	94,71
13,64	-3,79	17,43	4,60	2,35	130,97	36,67	94,30
17,25	-0,88	18,13	2,00	1,45	103,91	23,23	80,68
15,17	-3,11	18,28	4,58	1,93	132,00	31,46	100,54
19,71	1,34	18,37	2,40	1,62	132,62	26,07	106,55
17,62	-0,94	18,56	2,50	1,43	118,46	23,43	95,03
17,59	-1,02	18,61	3,33	1,81	121,36	29,75	91,61
17,13	-4,38	21,51	6,20	3,22	221,70	61,24	160,46
17,61	-4,04	21,65	4,00	1,87	159,70	35,65	124,05
16,16	-6,23	22,39	4,00	2,59	203,27	51,47	151,80
13,60	-9,47	23,07	3,12	1,62	162,41	33,45	128,96
13,56	-9,69	23,25	2,30	1,41	153,21	29,29	123,92
17,34	-8,24	25,58	3,00	1,91	192,34	43,09	149,25
16,54	-11,12	27,66	2,40	1,67	198,14	41,03	157,11
16,83	-12,30	29,13	4,60	2,61	279,05	67,18	211,87
18,12	-12,22	30,34	2,60	2,13	264,62	56,79	207,83
17,61	-16,22	33,83	1,20	1,24	234,66	37,09	197,57
18,54	-20,00	38,54	0,40	0,85	275,35	44,11	231,24
17,65	-24,50	42,15	0,60	1,95	362,51	72,52	289,99

щие результаты. Зависимость  
удельного теплотребления от

перепада температур и скорости  
ветра выражается уравнением

$$q = -65,7048 + 9,3692 \cdot \Delta T + 8,5749 \cdot v \pm 24,7537 \text{ Вт/м}^2. \quad (10)$$

Коэффициент корреляции  
0,9491. Для кратности воздухооб-

мена регрессионное уравнение  
имеет следующий вид:

$$N = 0,6318 + 0,0133 \cdot \Delta T + 0,323 \cdot v \pm 0,3079. \quad (11)$$

Коэффициент корреляции  
0,8255.

Инфильтрационные удельные  
теплопотери  $q_{\text{инф}}$ :

$$q_{\text{инф}} = -21,5751 + 1,8347 \cdot \Delta T + 6,1534 \cdot v \pm 6,5527 \quad (12)$$

при коэффициенте корреляции 0,9190.

Расчетные теплотехнические характеристики теплицы: обобщенный коэффициент теплопередачи  $K$ , коэффициент теплопередачи через ограждение  $K_T$  коэффи-

циент инфильтрации расчетный  $K_{расч}$  и реальный  $K_p$ , а также поправочный коэффициент инфильтрации по скорости ветра  $K_v$  представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные теплотехнические характеристики учебно-опытной теплицы (ООС, 1991—1996 гг.)

$\Delta T, ^\circ C$	$v, м/с$	$K, Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$	$K_T, Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$	$K_p$	$K_{расч}$	$K_v$
12,87	2,00	5,78	4,43	1,306	1,058	1,234
13,29	1,80	5,77	4,40	1,311	1,061	1,236
13,39	2,20	6,20	4,92	1,259	1,061	1,187
14,00	1,12	5,77	4,60	1,254	1,064	1,179
16,60	2,47	7,54	5,56	1,356	1,078	1,258
17,24	2,60	7,17	5,65	1,268	1,080	1,174
17,43	4,60	7,51	5,41	1,389	1,087	1,278
18,13	2,00	5,73	4,45	1,288	1,086	1,186
18,28	4,58	7,22	5,50	1,313	1,088	1,207
18,37	2,40	7,22	5,80	1,245	1,084	1,148
18,56	2,50	6,38	5,12	1,247	1,085	1,149
18,61	3,33	6,52	4,92	1,325	1,087	1,219
21,51	6,20	10,31	7,46	1,382	1,103	1,253
21,65	4,00	7,38	5,73	1,287	1,103	1,167
22,39	4,00	9,08	6,78	1,339	1,108	1,208
23,07	3,12	7,04	5,59	1,259	1,115	1,129
23,25	2,30	6,59	5,33	1,236	1,116	1,107
25,58	3,00	7,52	5,83	1,289	1,124	1,147
27,66	2,40	7,16	5,68	1,261	1,137	1,109
29,13	4,60	9,58	7,27	1,317	1,144	1,151
30,34	2,60	8,73	6,85	1,273	1,105	1,152
33,83	1,20	6,94	5,84	1,188	1,169	1,016
38,54	0,40	7,14	6,00	1,191	1,195	1,000
42,15	0,60	8,60	6,88	1,250	1,219	1,025

Математическая обработка расчетных характеристик дала следующие результаты:

$$K = 3,0737 + 0,1064 \cdot \Delta T + 0,6680 \cdot v \pm 0,6277; \quad (13)$$

$$K_T = 2,5665 + 0,0906 \cdot \Delta T + 0,3934 \cdot v \pm 0,4340. \quad (14)$$

Коэффициенты корреляции соответственно равны 0,8707 и 0,8799.

Следует отметить, что для коэффициента теплопередачи через ограждение  $K_T$  регрессионная зависимость близка к значениям, полученным институтом Гипрони-сельпром [18]:

$$K_r = 2,4664 + 0,0989 \cdot \Delta T + 0,3450 \cdot v \pm 0,1612. \quad (15)$$

Расчеты, проведенные по этому уравнению при климатических данных эксперимента, дали среднее значение  $K_r = 5,67$ , всего лишь на 0,88% ниже, полученного нами. Более существенными различиями отличаются инфильтрационные теплопотери теплицы. Так, среднее значение реального коэффициента инфильтрации составило 1,285, а расчетного — 1,106. Это приводит к занижению общего теплопотребления теплицы на 16,3% (значение  $K_a = 1,163$ ).

Конечно, нельзя это различие целиком приписывать только неучтенному в методике института Гипронисельпром ветровому фактору, поскольку неизвестны характеристики конкретных соору-

жений, на базе которых проводились исследования сотрудниками института. Однако заметим, что в период экспериментальных исследований на Овощной опытной станции в 1991—1996 гг. ограждение теплицы поддерживалось в исправном состоянии, что позволяет считать ее стандартным сооружением, с нормальными условиями эксплуатации.

### Выводы

1. Зависимость удельного теплопотребления, коэффициента теплопередачи и кратности воздухообмена от перепада температур и скорости ветра представляется следующими уравнениями регрессии:

$$q = -65,7048 + 9,3692 \cdot \Delta T + 8,5749 \cdot v \pm 24,7537;$$

$$K = 3,0737 + 0,1064 \cdot \Delta T + 0,6689 \cdot v \pm 0,6277;$$

$$N = 0,6318 + 0,0133 \cdot \Delta T + 0,3231 \cdot v \pm 0,3079.$$

2. Зависимость удельных инфильтрационных теплопотерь от климатических параметров выра-

жается следующим уравнением регрессии:

$$q_{\text{инф}} = -21,5751 + 1,8347 \cdot \Delta T + 6,1534 \cdot v \pm 6,5527.$$

3. Значение суммарного коэффициента инфильтрации за период исследований составило 1,2856, расчетного — 1,106.

4. Коэффициент инфильтрации теплицы за счет скорости ветра может быть принят равным 1,163.

лотехнике, вып. 2. М.: Высшая школа, 1977, с. 60—79. — 2. *Иоффе И.А.* К аэродинамическому анализу фильтрационного воздуха в культивационных сооружениях и методике ее расчета. — В сб. трудов по агрономической физике, вып. 36. Микроклимат культивационных сооружений в условиях Нечерноземной зоны. Л.: Гидрометеониздат, 1976, с. 23—48. — 3. *Иоффе И.А., Абросимова Л.Н.* Экспериментальное исследование коэффициента обмена и

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Есин В.В.* Методика расчета теплового баланса сооружений защищенного грунта. — В сб. научно-методических статей по теп-

расчет воздухопроницаемости ограждения блочной одногектарной теплицы. — В сб. трудов по агрономической физике, вып. 36. Микроклимат культивационных сооружений в условиях Нечерноземной зоны. Л.: Гидрометеиздат, 1976, с. 49—50. — 4. *Клеринг Х.П.* Оптимизация использования солнечной радиации и других видов энергии в производстве тепличных овощей. — Канд. дис. М., 1982. — 5. *Климов В.В., Кудряшов Ю.С., Иванов В.И.* Исследование воздухообмена в однослойной пленочной теплице. — Изв. ТСХА, 1971, Вып. 4, С. 227—231. — 6. *Климов В.В.* Исследование естественного воздухообмена в экспериментальной теплице с водонаполненной кровлей. — Изв. ТСХА, 1976, вып. 5, с. 220—226. — 7. *Климов В.В.* Определение энергетических характеристик опытно-промышленной теплицы при Каширской ГРЭС. — Изв. ТСХА, 1994, вып. 3, с. 160—170. — 8. *Климов В.В.* Влияние способа распределения подогретого воздуха в экспериментальной теплице с воздушно-конвективным отоплением и использованием низкопотенциального теплоносителя на коэффициент теплопередачи. — Изв. ТСХА, 1995, вып. 1, с. 150—159. — 9. *Климов В.В.* Исследование воздухообмена в экспериментальной теплице с воздушно-конвективным отоплением на низкопотенциальном теплоносителе. — Изв. ТСХА, 1995, вып. 2, с. 160—169. — 10. *Климов В.В.* Пути снижения энергозатрат в овощеводстве защищенного грунта. (Лекция для студентов и слушателей ФПК). М.: Изд-во МСХА, 1984. — 11. *Кур-*

*тнер Д.А., Захаров Н.Г.* Исследование лучистого теплообмена и определение коэффициентов теплопередачи через ограждающие конструкции из светопрозрачной полиэтиленовой пленки. — В кн.: Полимерные пленки в овощеводстве. М.: Колос, 1967. — 12. *Куртнер Д.А., Чудновский А.Ф.* Расчет и регулирование теплового режима в открытом и защищенном грунте. Л.: Гидрометеиздат, 1969. — 13. *Масленников В.В.* Исследование и разработка рациональных схем теплоснабжения тепличных комбинатов на базе теплоэлектростанций. — Автореф. канд. дис. М., 1979. — 14. Методические указания по работе с информационно-управляющим комплексом на базе ЭВМ СМ-1634. — Ч. 1. Назначение, состав и технические характеристики комплексы. М.: Изд-во МСХА, 1991. — 15. Методические указания по работе с информационно-управляющим комплексом на базе ЭВМ СМ-1634. Ч. 2. Основы операторского обслуживания. М.: Изд-во МСХА, 1991. — 16. Постановление Правительства Российской Федерации от 7 февраля 1996 г., № 135. — 17. Прейскурант 09-01. Тарифы на электрическую и тепловую энергию. Издание Минэнерго СССР. М., 1990. — 18. Руководство по теплотехническому расчету культивационных сооружений. Орел: Гипронисельпром, 1982. — 19. *Сивагинский И.И., Ануфриев Л.Н.* Исследование теплотерь в пленочной теплице типа «Латвия» вследствие инфильтрации наружного воздуха. — Сб. молодых ученых и аспирантов НИИОХ. М., 1968, с. 412—423. —

20. *Sheard G.F.* Energy conservation in Horticulture Produced for the Royal Agricultural Society of England. Energy on the farm conference. 6 December, 1977. — 21. *Zabel-*

*titz C.* Gewachshäuser. Handbuch in Gartenbau und Landwirtschaft der Universität Hannover, 1986.

*Статья поступила 15 октября 1997 г.*

## SUMMARY

Results of investigating heat transfer coefficients, gas exchange ratio and specific heat losses in block greenhouse with different climatic parameters are considered.

Dependence of energetic indicators on meteorological factors obtained by methods of statistical analysis is examined.

The data of investigations conducted with employment of multifunctional information system allow to make more exact some energetic characteristics of protected ground constructions, which offers to use them more correctly in designing and feasibility study of greenhouse complexes.