Расчет теплового режима теплицы

Принцип действия теплицы предельно прост: солнечное излучение, проходя через прозрачное покрытие (стены и потолок) теплицы, нагревает почву и растения. Воздух, нагретый у почвы, удерживается стенами и потолком теплицы.

А.Н. Задеев,
инженер группы разработчиков специальных кабелей конструкторско-технологического бюро ООО «ССТ»

Теплицы, как правило, предназначены для выращивания рассады ранней весной с целью последующей её высадки в открытый грунт. В том случае, если в теплице существует система вентилирования, и растениям в теплице не угрожает перегрев поздней весной, летом и ранней осенью, в теплице может быть организован полный цикл выращивания какой-либо культуры.

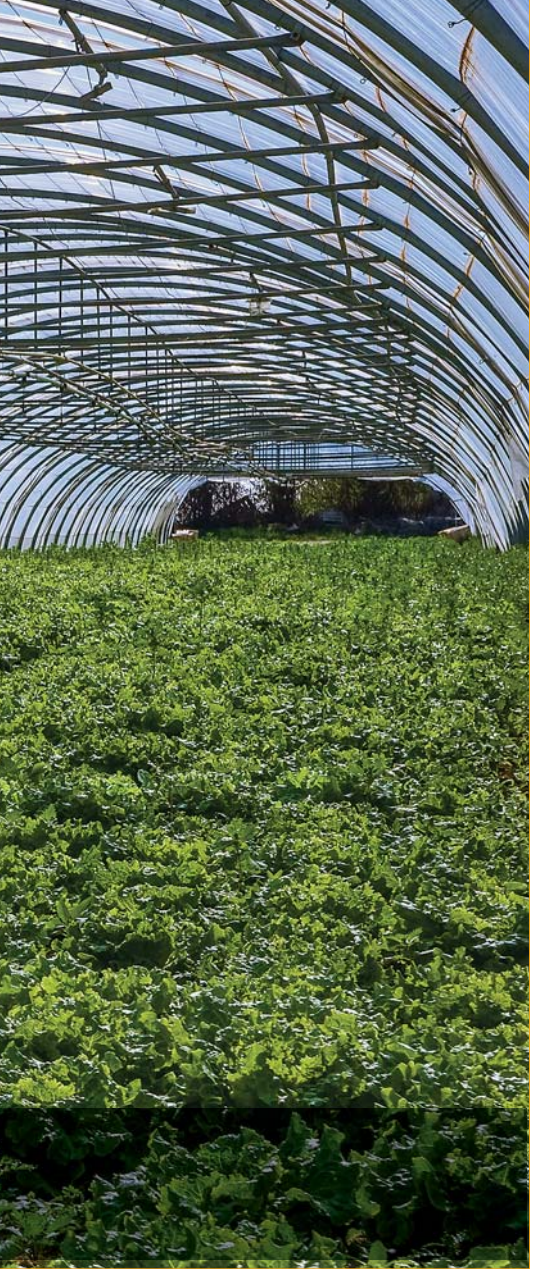
В этом случае теплица позволяет:

1. добиться продления сезона выращивания культур для сбора более чем одного урожая;

2. выращивать более теплолюбивые культуры.

Интерес представляет задача круглогодичного поддержания в теплице условий, благоприятных для выращивания различных культур, в регионе с холодной зимой, например в Подмосковье.

Для решения данной задачи требуется система обогрева теплицы. Для обогрева теплицы могут использоваться кабельные системы, такие как Green Box Agro, укладываемые в грунт, или трубчатые системы, в которых по трубах прокачивается заранее нагретый теплоноситель, на-



пример, вода или воздух. Трубчатые системы могут располагаться как в грунте, так и вдоль стен и потолка теплицы.

В дальнейшем расчете рассматривается три варианта системы обогрева:
ОБ №1: обогрев стенок теплицы;
ОБ №2: обогрев почвы в теплице;
ОБ №3: обогрев стенок теплицы и почвы внутри (далее – «комплексный»).

Следует обратить внимание, что в расчете не говорится о конкретном методе приложения тепла, не имеет значения, кабельная система или на основе трубок-теплообменников, речь идёт о численных значениях прикладываемой тепловой мощности.

Рассматривается теплица с периметром 4×8 м и высотой 3,5 м.
В любой задаче обогрева в первую очередь решается задача энергоэффективности, т. е. снижения требуемой на обогрев мощности и энергии посредством снижения тепловых потерь обогреваемого объекта. Очевидно, что теплоизоляция теплицы широко применяемыми материалами, такими как минеральная вата или вспененный каучук, не имеет смысла, т. к. задача стенок и крыши теплицы – пропускать солнечное излучение.
Для снижения теплопотерь теплицы в окружающую среду стенки и крыша теплицы выполнены с тройным остеклением. Согласно Пособию 2.91 к СНиП 2.04.05-91 термическое сопротивление тройного остекления составляет 0,46 м^{2}К/Вт, тогда как термическое сопротивление одинарного стекла равно 0,15 м^{2}К/Вт, т. е., используя тройное остекление вместо одинарного, теплопотери в окружающий воздух снижаются в 3 раза.
Коэффициент теплопропускания тройного остекления равняется 0,57 (согласно Пособию 2.91 к СНиП 2.04.05-91).

Расчет ведется для трех вариантов условий окружающей среды:

ОС №1: первые 7 дней марта 2011 г.;
ОС №2: первые 7 дней января 2011 г.;
ОС №3: вариант, аналогичный варианту ОС №2, но со снижением средней температуры воздуха до температуры холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 (минус 28 °С).

В зависимости от варианта условий окружающей среды изменяются температура воздуха, температура грунта и мощность солнечной радиации, падающей на землю.
Для принятия расчетной температуры окружающей среды вариантов № 1 и № 2 была проведена обработка данных, полученных на сайте wunderground.com, а именно почасового изменения температуры воздуха в Москве.

Мощность инсоляции для расчета была получена обработкой данных, принятых согласно Справочному пособию к СНиП 23-01-99.
Мощность обогрева подбиралась исходя из условия поддержания температуры на уровне 18 °С в верхнем слое грунта толщиной 350 мм.

Получение расчетных температур окружающей среды

Для расчета варианта условий окружающей среды ОС №1 использовано почасовое изменение температуры в Москве за 1–7 марта 2011 года (синяя кривая на рис. 1), обработанное следующим образом: почасовое распределение температуры за 7 суток заменяется повторяющимся 7 раз почасовым изменением температуры за одни сутки (красная кривая на рис. 1), температура в каждый часовой отрезок в новом распределении равняется средней температуре в этот же отрезок за 7 дней (например, температура в 15:00 в новом распределении равняется среднему значению из семи температур в 15:00 за 1–7 марта).
Для задания изменения температуры окружающей среды в расчетную модель оно приведено к синусоидальному виду (зеленая кривая на рис. 1).
Среднее расчетное значение температуры окружающей среды в этот период составляет минус 5,5 °С.
Для задания температуры грунта используется среднее значение температуры за февраль 2011 года (минус 11,6°С), также полученное по данным

Рис.1. Изменения температуры за 1–7 марта 2011 г. (реальное, осредненное, приведенное к синусоидальному виду для расчета).

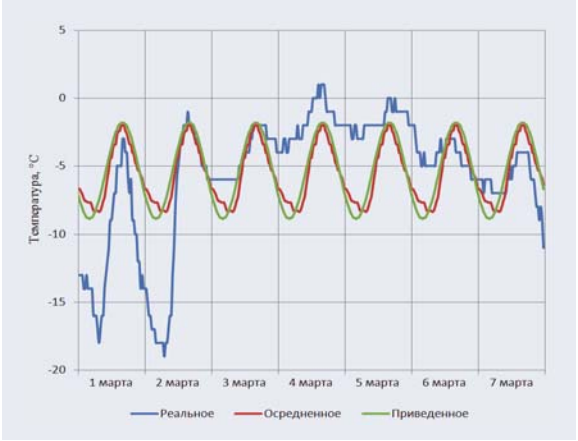


Таблица 1. Климатические параметры трех вариантов окружающей среды

№ варианта	Период	Средняя температура воздуха, °С	Отклонение от средней температуры в течение суток, °С	Температура грунта, °С
ОС№1	1–7 марта	–5,5	±3,2	–11,6
ОС№2	1–7 января	–8	±0,7	–7,3
ОС№3	"холодные" 1–7 января	–28	±2	–7,3

сайта wunderground.com. В расчете температура грунта не изменяется в течение суток.

Аналогичная обработка была проведена для расчета варианта условий окружающей среды ОС №2 (1–7 января), температура грунта принята равной среднемесячной температуре декабря согласно СНиП 23-01.99.

Для расчета варианта условий окружающей среды ОС №3 («холодные» 1–7 января) температура воздуха принята равной среднемесячной температуре декабря.

Климатические параметры рассматриваемых вариантов приведены в табл. 1

Учет в расчете солнечной радиации

Среднее суммарное количество тепла, поступающего на горизонтальную поверхность от прямой и рассеянной солнечной радиации (определяемое как среднемесячное количество тепла при действительных условиях облачности за многолетний период, деленное на число дней в месяце и на 24 часа), для Москвы принимается по Справочному пособию к СНиП 23-01-99. Описание изменения среднемесячной инсоляции в течение года полиноминальной функцией (в данном случае использовался полином шестой степени) позволяет оценить среднюю инсоляцию за любой интересующий нас период (рис. 2).

Во временном отрезке 1–7 марта средняя инсоляция на горизонтальную поверхность составляет 87,1 Вт/м^2, 1–7 января – 14,8 Вт/м^2.

Для расчета необходимо учитывать почасовое изменение мощности инсоляции в течение суток. Инсоляция задается следующим образом: в темное время суток (от заката и до рассвета) инсоляция равна нулю, в светлое время суток (от рассвета и до заката) инсоляция задается как положительная половина периода синусоиды. Амплитуда синусоиды подбирается таким образом, чтобы среднесуточная мощность инсоляции равнялась полученным выше значениям (рис. 3).

Мощность инсоляции задается на различных поверхностях как поверхностная мощность тепловыделения, Вт/м^2.

Согласно [1] на нагрев грунта идет 20–50 % мощности, падающей на нее. В расчете принято, что на нагрев идет 27 % мощности, поэтому при задании инсоляции на поверхности грунта средняя инсоляция на горизонтальную поверхность, Вт/м^2, умножается на 0,27.

При задании теплопоступления в теплицу за счет инсоляции рассматривается два варианта:

ИНС №1: все тепло выделяется в остеклении теплицы. При задании мощности тепловыделения в остеклении теплицы принятое значение мощности инсоляции умножается на коэффициент теплопропускания теплицы (0,57).

ИНС №2: тепло выделяется в остеклении и на поверхности почвы внутри теплицы. Принимая степень черноты стекла 0,91, считаем, что 9 % тепла отражается.

Согласно коэффициенту теплопропускания теплицы 57 % проходит сквозь остекление к почве. Оставшиеся 34 % тепла выделяются в стекле.

Принимаем, что из дошедшего до почвы тепла на ее нагрев идет 27 % от прошедших остекление 57 % (т. е. порядка 15 % от исходного значения). Оставшаяся часть прошедшего остекление тепла задается как объемная мощность тепловыделения в объеме воздуха в теплице. Теплопоступление радиации к почве через боковые стенки теплицы в расчете не учитывается.

В обоих вариантах принимаем, что мощность падающей на крышу теплицы энергии равняется мощности инсоляции на горизонтальную поверхность; мощность, падающая на боковые стенки, принимается в два раза меньшей.

Рис. 2. Изменение инсоляции в течение года.

Рис. 3. Изменение инсоляции в течение суток.

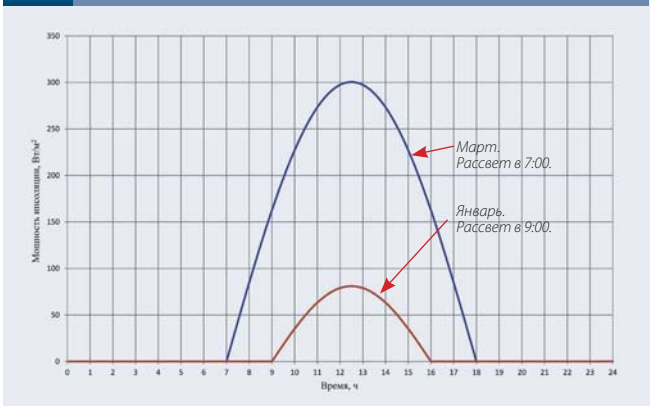


Рис. 4. Поверхности тепловыделения за счет инсоляции и доля выделяемой мощности. За 100% принята полная мощность инсоляции на горизонтальную поверхность.

На рис. 4 красным обозначены поверхности, на которых происходит тепловыделение.

Дополнительно рассматривается вариант без учета теплопоступления в теплицу за счет инсоляции.

Выбор варианта учета инсоляции

Для выбора методики учета поступления тепла в теплицу за счет солнечной инсоляции решалась задача по методике, описанной в п. 5, для варианта условий окружающей среды ОС №1 (1–7 марта).

Вариант условий окружающей среды: 1–7 марта, средняя температура наружного воздуха –5,3 °С, температура грунта –11,6 °С. Характерные особенности вариантов инсоляции приведены в табл. 2.

Расчет показал, что использование варианта учета теплопоступления в теплицу за счет инсоляции ИНС №1 (только на поверхности стекла) приводит к результатам, практически не отличающимся от тех, которые получены вообще без учета теплопоступления за счет инсоляции.

При этом использование варианта ИНС №2 (учет тепловыделения на всех поверхностях и в воздухе) дает результат, более ощутимо отличающийся в положительную сторону от результата, полученного без учета инсоляции.

Так же, вариант ИНС №2 является более корректным с физической точки зрения, так как учитывает прямой нагрев всех поверхностей солнцем и не приводит к «пропаже» поступающего тепла, как это происходит при использовании варианта ИНС №1.

В дальнейшем расчете используется вариант учета теплопоступления за счет инсоляции ИНС №2.

Расчет показал (см. табл. 3), что из-за высокой теплоемкости грунта амплитуда изменения его температуры в течение суток составляет 0,1–0,5 °С. Это позволяет использовать неравномерный обогрев в течение суток.

Таблица 2. Рассмотренные варианты инсоляции

Вариант учета теплопоступления в теплицу	Средняя по объему температура почвы глубиной 350 мм внутри теплицы, °С, за сутки			Средняя по объему температура воздуха внутри теплицы, °С, за сутки		
	минимал.	средняя	макс.	минимал.	средняя	макс.
ОС№1	–6,2	–6,0	–5,9	–7,3	–4,9	–2,8
ОС№2	0,6	1,1	1,5	–3,9	0,0	4,7
ОС№3	–7,1	–7,0	–6,9	–7,7	–6,1	–4,4

Таблица 3. Результаты расчета при отсутствии обогрева

Вариант условий окружающей среды	Средняя температура наружного воздуха, °С	Температура грунта, °С	Средняя по объему температура почвы глубиной 350 мм внутри теплицы за сутки, °С			Средняя по объему температура воздуха внутри теплицы за сутки, °С		
			мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.
1–7 марта	–5,3	–11,6	0,6	1,1	1,5	–3,9	0,0	4,7
1–7 января	–8	–7,3	–5,7	–5,6	–5,4	–7,3	–6,5	–5,1
“холодные” 1–7 января	–28	–7,3	–17,4	–17,2	–17,1	–24,5	–23,0	–21,5

Таблица 4. Результаты расчета первого варианта обогрева теплицы ОБ№1 (обогрев стенок)

Вариант условий окружающей среды	Мощность обогрева стенок теплицы, Вт/м^2 (день / ночь)	Полная мощность обогрева, кВт (день / ночь)	Средняя по объему температура почвы глубиной 350 мм внутри теплицы за сутки, °С			Средняя по объему температура воздуха внутри теплицы за сутки, °С		
			мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.
1–7 марта	20 / 101	1,5 / 7,5	18,1	18,3	18,5	14,8	24,6	32,8
1–7 января	23 / 115	1,7 / 8,5	17,6	18,2	18,7	11,3	27,5	34,2
“холодные” 1–7 января	34 / 171	2,5 / 12,7	17,3	18,2	19,0	3,6	27,6	38,0

Результаты расчета мощности обогрева теплицы

Мощность обогрева (см. табл. 4–6) подбиралась таким образом, чтобы температура почвы в теплице, в слое глубиной 350 мм, составляла 18 °С.

Так же, мощность обогрева в темное время суток принята в 5 раз большей, чем мощность днем.

Примечание: Обоснование разницы между дневной и ночной мощностью обогрева в данной статье не приводится.

На рис. 5 показано изменение средней температуры почвы и средней температуры воздуха внутри тепли-

Таблица 5. Результаты расчета второго варианта обогрева теплицы ОБ№2 (обогрев почвы)

Вариант условий окружающей среды	Мощность обогрева почвы, Вт/м² (день / ночь)	Полная мощность обогрева, кВт (день / ночь)	Средняя по объему температура почвы глубиной 350 мм внутри теплицы за сутки, °С			Средняя по объему температура воздуха внутри теплицы за сутки, °С		
			мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.
1–7 марта	12 / 60	0,4 / 1,9	18,0	18,3	18,7	3,0	7,2	12,1
1–7 января	14 / 69	0,4 / 2,2	18,3	18,5	18,7	2,7	3,5	4,9
"холодные" 1–7 января	20 / 102	0,7 / 3,3	17,9	18,3	18,7	–9,7	–8,3	–6,8

Таблица 6. Результаты расчета третьего варианта обогрева теплицы ОБ№3 (комплексный обогрев)

Вариант условий окружающей среды	Мощность обогрева почвы, Вт/м² (день/ночь)	Мощность обогрева стенок теплицы, Вт/м² (день/ночь)	Полная мощность обогрева, кВт (день/ночь)	Средняя по объему температура почвы глубиной 350 мм внутри теплицы за сутки, °С			Средняя по объему температура воздуха внутри теплицы за сутки, °С		
				мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.
1–7 марта	12 / 60	12 / 60	0,4 / 1,9	18,0	18,3	18,7	3,0	7,2	12,1
1–7 января	14 / 69	14 / 69	0,4 / 2,2	18,3	18,5	18,7	2,7	3,5	4,9
"холодные" 1–7 января	20 / 102	20 / 102	0,7 / 3,3	17,9	18,3	18,7	–9,7	–8,3	–6,8

Таблица 7. Сводные результаты расчетов

Вариант условий окружающей среды	Средняя температура наружного воздуха, °С	Температура грунта, °С	Полная мощность обогрева, кВт		
			обогрев почвы	комплексный обогрев	обогрев стенок
1–7 марта	–5,3	–11,6	1,7	3,1	6,7
1–7 января	–8	–7,3	1,8	3,1	6,9
"холодные" 1–7 января	–28	–7,3	2,6	4,6	10,1

цы при отсутствии обогрева (синие линии) и при наличии комплексного обогрева (красные линии) в «холодную» первую неделю января:

Сводные результаты расчета требуемых мощностей обогрева теплицы показаны в табл. 7.

Выводы по результатам расчета

1. Расчет температурных полей с теплице при отсутствии обогрева показал, что метод учета поступающей в теплицу солнечной радиации играет ощутимую роль в определении температуры почвы в теплице (1–7 марта: температура почвы в теплице минус 7 °С при неучете инсоляции, минус 6 °С при выделении мощности только в стенке и плюс 1 °С при выделении тепла на стенках и поверхности почвы). Температура воздуха в теплице от метода учета поступающей в теплицу солнечной радиации зависит слабее, чем температура почвы. Для расчета был выбран вариант учета инсоляции на всех поверхностях.

2. При решении задачи поддержания температуры почвы наименьшая мощность обогрева требуется при обогреве почвы, но в этом случае наблюдается недогрев воздуха в теплице вплоть до отрицательных температур.

3. Наибольшая мощность требуется при обогреве стенок и крыши теплицы (без обогрева почвы). В этом случае температура воздуха в теплице ощутимо превышает температуру почвы и достигает значений свыше плюс 30 °С.

4. Оптимальным выглядит вариант комплексного обогрева. В этом случае появляется возможность снизить мощность почвенного обогрева во избежания перегрева корней растений и уменьшить разницу между температурами почвы и воздуха. При таком подходе требуется ориентировочно в два раза больше мощности, чем при обогреве только почвы. ПЭ

Литература:

1. П. П. Коваленко, Л. Н. Орлова. Городская климатология – М.: Стройиздат, 1993.

2. В. В. Климов. Оборудование теплиц для подсобных и личных хозяйств – М.: Энергоатомиздат, 1992.

3. Пособие 2.91 к СНиП 2.04.05-91. Расчет поступления теплоты солнечной радиации в помещения.

4. СНиП 23-01.99. Строительная климатология.

5. Справочное пособие к СНиП 23-01-99.

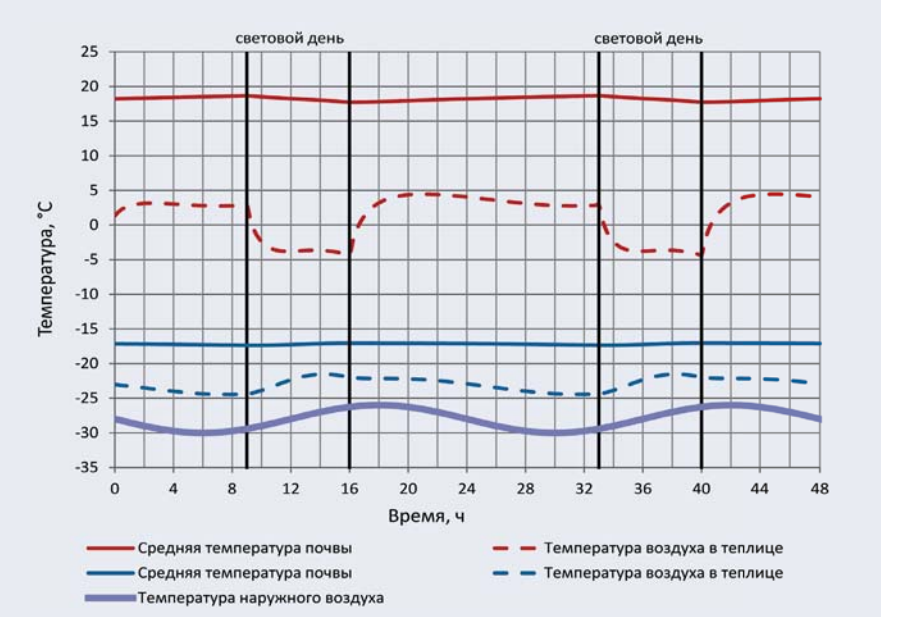



Рис. 5. Изменение температуры почвы и воздуха в теплице.