

В.Н.Дашков, кандидат технических наук

В.И.Клют, аспирант

УП «БелНИИМСХ»

УДК 001.891.573:631.544:631.588.6

## Предпосылки разработки математической модели теплоснабжения весенне-летних теплиц

В Республике Беларусь в весенний и ранний осенний периоды имеет место большая продолжительность светового дня и солнечного тепла может быть достаточно для обогрева пленочных теплиц, но необходимо учитывать неравномерность поступления солнечной энергии в течение суток, зависимость количества ее поступления от состояния атмосферы. Поэтому целесообразно иметь в системе обогрева подпочвенный аккумулятор тепла для накопления тепловой энергии. Полученные аналитические выражения позволяют выбрать материал для подпочвенного аккумулятора тепла, используемого в теплице.

Выращивание овощей в условиях защищенного грунта является одной из самых энергоемких отраслей сельскохозяйственного производства, что в условиях роста цен на традиционные энергоносители резко сказывается на увеличении себестоимости выпускаемой продукции.

В настоящее время в овощеводческих хозяйствах Республики Беларусь площадь защищенного грунта под пленочными теплицами составляет около 200 га, а также около 1000 га пленочных теплиц находится в частном секторе. Однако большинство весенних пленочных теплиц в овощеводческих хозяйствах фактически не используется. Это произошло вследствие низкой урожайности овощных культур, которая находилась на уровне 4-7 кг/м<sup>2</sup>, высокой себестоимости их выращивания в пленочных теплицах, недостаточного матери-

In Belarus in spring and autumn the daylight hours are quite long. When using solar energy for plastic greenhouse heating we must take into consideration variation of incoming solar energy during the day, dependence upon state of atmosphere. In this case it is expedient to include a subsoil heat accumulator in the heating system for it to store the heat energy. The derived analytical expression allows also choosing a material for manufacturing subsoil heat accumulators to be installed in greenhouses.

ально-технического обеспечения, а также низкого уровня применяемых технологий.

Для повышения эффективности работы тепличных хозяйств идут как по пути увеличения урожайности, применяя новейшие технологии выращивания, так и по пути снижения уровня затрат энергоресурсов, сводя до минимума потери тепла из теплиц (теплоизоляция стен, покрытий и т.д.) и применяя местные топливные ресурсы в сочетании с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в частности энергию солнечной радиации. В таблице показано изменение дневной суммы плотности потока солнечной радиации, а на рисунке 1 продолжительности солнечного сияния в центральной зоне Республики Беларусь помесячно.

Данные метеорологических наблюдений показывают, что, начиная с марта месяца, количество солнечной энер-

Таблица. Дневные суммы плотности потока солнечной радиации при средней облачности (по данным актинометрической станции "Минск")

Вид солнечной радиации	Плотность потока радиации, МДж/м <sup>2</sup>											
	месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
На горизонтальной поверхности:												
прямая	0,49	1,43	4,62	6,34	9,70	11,49	10,25	7,29	4,97	1,86	0,41	0,26
рассеянная	1,66	3,42	5,49	7,23	8,91	9,78	9,26	7,55	5,45	3,34	1,64	1,10
суммарная	2,15	4,85	10,11	13,57	18,61	21,27	19,51	14,84	10,42	5,20	2,05	1,36
Прямая радиация на перпендикулярной солнечным лучам поверхности	2,25	4,61	10,85	11,86	16,14	18,74	16,68	12,87	10,55	5,13	1,75	1,48

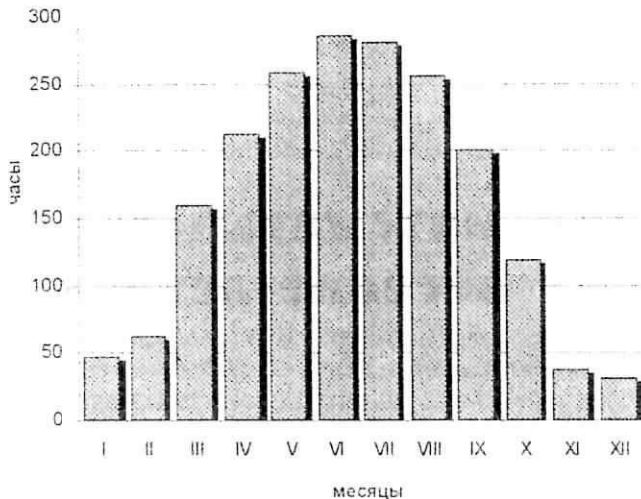


Рис. 1. Распределение продолжительности солнечного сияния по месяцам года в центральной зоне Республики Беларусь

гии, возможной для использования в зоне Республики Беларусь, значительно возрастает. Это показывает перспективность использования установок на основе нетрадиционной энергетики для снижения энергозатрат в весенних пленочных теплицах для возделывания ранних овощей.

Учитывая, что в марте-апреле в ночное время сохраняются отрицательные температуры воздуха, особую актуальность приобретает проблема аккумуляции солнечной энергии в дневное время с целью ее использования в темный период суток.

Во многих странах также ведутся исследования по аккумуляции тепловой энергии солнца [1]. На сегодняшний день наиболее эффективным методом использования солнечной энергии является применение в пленочных теплицах систем обогрева с подпочвенными аккумуляторами тепла. На рисунке 2 представлена схема системы воздушно-солнечного отопления и теплоаккумулирующая система, примененная во Франции [2].

Вентилятор транспортировал холодный воздух в течение ночи через аккумулятор, для того, чтобы нагреть его и затем возвращал назад в теплицу.

Типичные теплицы коммерческого типа имеют низкую теплоемкость. Избыток тепла, полученный теплицей в течение дня, уходит в окружающую среду, тогда как ночью требуется дополнительное тепло для поддержания соответствующей температуры воздуха. Хотя увеличение теплоемкости за счет использования воды, гравия или материалов с фазовым переходом приводит к уменьшению энергетических затрат, высокие капитальные затраты, вложенные в получение и содержание этих материалов, ограничивают их применение. Тем не менее, грунт под теплицей является легкодоступным, имеет низкую стоимость и значительную теплоемкость, которая до настоящего времени используется недостаточно эффективно. Накапливая избыток тепла в грунте теплицы, потребность дополнительной

энергии может быть уменьшена за счет использования этого сохраненного тепла. Кроме того, сокращение потребностей дополнительной энергии дает возможность для понижения температуры воздуха теплицы, поскольку обеспечивается теплом корневая зона.

Возможно также в качестве теплоаккумулирующего материала использовать местные строительные материалы, такие как гравий, щебень, бугорный камень, сланцы, фосфориты и отходы керамического производства.

Система подпочвенного аккумуляции тепловой энергии имеет следующие преимущества по сравнению с другими системами:

- постоянная готовность системы обогрева к работе;
- большая скорость разогрева;
- высокая равномерность распределения температуры по ширине и длине обогреваемого участка;
- возможность создания полностью автоматизированной системы обогрева, способной с достаточно высокой точностью поддерживать заданный температурный режим в зоне корнеобразования;
- отсутствие загрязнения окружающей среды.

Система аккумуляции может функционировать в двух режимах:

1. Тепло аккумулируется в дневное время в грунте за счет его пассивного разогрева солнечной энергией и отбирается ночью.

2. Днем нагретый воздух из теплицы нагнетается в трубчатый подпочвенный аккумулятор и таким образом избыток тепла накапливается для ночного использования.

Необходимо отметить, что эффективность аккумуляции солнечной энергии грунтом в первом варианте будет снижаться по мере развития растений и соответствующего затенения ими поверхности почвы.

Как известно, температурный режим теплицы зависит от многих факторов: количества падающей солнечной радиации, угла падения солнечных лучей к прозрачной поверхности, качества и количества слоев прозрачной изоляции, коэффициента затенения, запыленности и т.д.



Рис. 2. Система воздушно-солнечного отопления и теплоаккумулирующая система

Прошедшая солнечная энергия поглощается почвой, растениями, элементами конструкции, в результате чего повышается температура внутреннего объема воздуха.

Температура воздуха в теплице в течение суток меняется, поэтому в отдельных случаях пользуются ее средними значениями. Температурный режим теплицы также зависит от коэффициента теплопередачи ограждающих частей. Улучшив теплоизоляционные качества, можно получить оптимальный температурный режим. Часть прошедшей солнечной энергии в дневное время аккумулируется в подпочвенном аккумуляторе тепла и частично в грунте, находящемся вокруг аккумулятора и в верхних слоях почвы.

Таким образом, в ночное время температура воздуха в теплице поддерживается за счет аккумулированной энергии в дневное время суток. В подпочвенном аккумуляторе тепло накапливается за счет принудительного движения через него теплоносителя (нагретого воздуха). Параметры воздуха характеризуются температурой, относительной влажностью и теплосодержанием входящего и выходящего из слоя воздуха. В теплицах важен влажностный режим.

Аккумуляция энергии в грунте, находящемся вокруг аккумулятора, происходит за счет теплопередачи через стенки аккумулятора. При этом в точках, близлежащих к поверхности, температура в процессе зарядки выше, чем в удаленных точках. В процессе разрядки температура поверхности уменьшается.

Аккумуляция энергии в верхних слоях почвы растительного покрова происходит одновременно с поглощением солнечных лучей и проникновением температурных волн в толщу почвы. Следовательно, температура почвы также периодически меняется. Вышеуказанные явления, а также поступление тепла в теплицу через ограждения, теплоаккумуляция, изменение температуры и влажности формируют в целом температурный режим теплицы.

Рассмотрим систему, основными элементами которой являются: подпочвенный теплоаккумулятор с заложенными внутри него дренажными керамическими или перфорированными трубами из полиэтилена высокой плотности и электрические тепловентиляционные агрегаты. Полиэтиленовые трубы соединяются через коллекторы с электрическими тепловентиляционными агрегатами, установленными внутри теплицы.

Для определения параметров данной системы целесообразно использовать метод математического моделирования, то есть с помощью аналитических уравнений, которые позволяют учесть два источника энергии, описать процесс накопления тепловой энергии.

При составлении математической модели были приняты следующие допущения:

- полагаем, что температуры материала и воздуха по сечению одинаковы;
- температура не влияет на теплофизические характеристики воздуха и материала;
- коэффициент теплообмена не меняется по длине аккумулятора;

- кондуктивный перенос тепла за счет небольшой площади контакта частиц в материале пренебрежимо мал по сравнению с конвективным.

- рассматриваем одномерную задачу.

С учетом допущений система уравнений, описывающая процесс теплообмена в подпочвенном аккумуляторе, может быть представлена следующим образом.

Общее уравнение теплового баланса теплицы будет иметь вид:

$$Q_{\text{ср}} = Q_{\text{гр}} + Q_{\text{возд}} + Q_{\text{констр}} + \Delta Q, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{ср}}$  — приход энергии солнечной радиации, МДж;

$Q_{\text{гр}}$  — поглощение энергии на разогрев грунта, МДж;

$Q_{\text{возд}}$  — поглощение энергии на разогрев воздуха, МДж;

$Q_{\text{констр}}$  — поглощение энергии на разогрев ограждающих конструкций, МДж;

$\Delta Q$  — потери энергии через ограждающие конструкции, вентилиацию, утечки и т.д., МДж.

Для зарядки аккумулятора может быть использована часть тепла, поглощенного грунтом за счет теплопереноса в его слое к аккумулирующим трубам, а также часть тепла, поглощенного воздухом и отбираемого при его протекании по трубам аккумулятора.

Уравнение нестационарного теплообмена:

для элемента объема  $dV = F dx$  материала

$$C_M \rho_M \partial x x \times \partial t t_M = \alpha_v F \partial x x (t - t_M) \partial t, \quad (2)$$

для воздуха

$$C_P G F \partial t t \partial t = \alpha_v F \partial x x (t_M - t) \partial t, \quad (3)$$

где  $C_M$  и  $C_P$  — теплоемкости материала и воздуха, Дж/кг $^{\circ}$ С;

$t_M$  и  $t$  — температуры материала и воздуха,  $^{\circ}$ С;

$F$  — площадь поперечного сечения аккумулятора, м $^2$ ;

$\tau$  — время, с;

$G$  — расход воздуха, кг/м $^{\circ}$ С.

Начальное условие:

$$t_M(0, x) = t_{M,0}, \quad (4)$$

где  $t_{M,0}$  — температура материала к началу зарядки.

Граничное условие записывается в виде:

$$t(\tau, \theta) = t_{\text{ср}} + A_T \cos \left[ \frac{2\pi}{T} (\tau_3 + \tau - \tau_{\text{max}}) \right]. \quad (5)$$

Представленная система уравнений позволяет определить параметры подпочвенного теплового аккумулятора при известных теплофизических характеристиках используемого теплоаккумулирующего материала.

### Решение задачи

После соответствующих преобразований для уравнений (2-5) получим:

$$\frac{\partial t_M}{\partial \tau} = N_M (t - t_M), \quad (6)$$

$$\frac{\partial t}{\partial x} = N(t_M - t), \quad (7)$$

$$N_M = \frac{\alpha_V}{C_M \rho_M}; \quad N = \frac{\alpha_V}{C_p G}. \quad (8)$$

Здесь  $t_{cp}$ ,  $A_T$  — средняя температура воздуха и амплитуда ее колебаний в теплице, °C;

$T$  — период колебаний, с;

$T_z, \tau_{max}$  — время начала зарядки и наступления максимума температуры в теплице, с;

Для решения полученных уравнений определяем из (6) параметр  $t_M$  и, подставляя его в уравнение (7), получаем:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x \partial \tau} + N \frac{\partial t}{\partial \tau} + N_M \frac{\partial t}{\partial x} = 0. \quad (9)$$

Особенностью решения дифференциального уравнения (9) является задание определенных начальных условий.

В момент времени  $\tau=0$ , то есть в начале процесса зарядки, по длине теплового аккумулятора устанавливается некоторое начальное распределение температур. Очевидно, что профиль температур при этом зависит от  $t_{M,0}$  и температуры воздуха на входе в тот же момент времени  $t_0$ .

Распределение температур можно получить из (7) при интегрировании его по оси  $X$  при условии  $\tau=0$  и граничных условиях  $t=t_0$ .

Решение уравнения (7) известно и может быть записано в следующем виде:

$$t|_{\tau=0} = t_{M,0} + (t_0 - t_{M,0}) \exp\left(-\frac{\alpha_V \times \chi}{C_p \times G}\right). \quad (10)$$

Таким образом, исходная задача сводится к смешанной задаче Коши с начальным условием (10) и граничным условием (5).

По результатам вычислений можно определить количество тепла, запасенного за весь период процесса зарядки аккумулятора:

$$Q_{ак} = C_p G F \sum_{j=1}^{j=i} (t_0^j - t_N^j) \Delta t. \quad (11)$$

Полученное уравнение (11) не учитывает использование внутреннего источника тепла, которым является система воздухопроводов, расположенная внутри теплоаккумулирующего материала.

С учетом внутреннего источника тепловой энергии уравнение (11) запишется в следующем виде:

$$Q_{ак} = C_p G F \sum_{j=1}^{j=i} (t_0^j - t_N^j) \Delta t + q_V, \quad (12)$$

где  $q_V$  — количество теплоты, выделяемое внутренним источником энергии.

Особенность данного источника заключается в изменении количества высвобожденного тепла по длине гряды теплицы.

На рисунке 3 показана схема расположения труб в грунте. В дневное время верхний слой грунта аккумули-

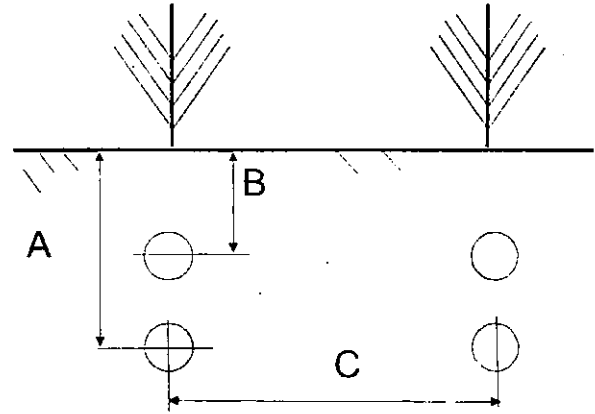


Рис. 3. Схема расположения труб в грунте

рует как прямую солнечную радиацию, поступающую через пленку теплицы, так и тепло из воздуха, забираемого вентилятором из теплицы и продуваемого через трубы в грунте.

В ночное время, чтобы нагреть объем теплицы теплом, саккумулированным в дневное время грунтом, холодный воздух продувается только через нижние секции грунтовых труб.

Объем грунта вокруг нижних секций закопанных труб играет роль аккумулятора. Через верхние секции грунтовых труб холодный воздух теплицы в ночное время не продувается, грунт вокруг этих труб играет лишь роль накопителя солнечной радиации. Нецелесообразно было бы использовать верхние секции грунтовых труб для аккумуляции тепла, так как это может привести к возможным неблагоприятным последствиям — сильному понижению температуры грунта в корневой зоне, вследствие чего в некоторых случаях возможна гибель растений.

## Выводы

1. В Республике Беларусь возможно использование установок нетрадиционного типа для снижения энергозатрат в весенних пленочных теплицах.

2. С помощью уравнений теплообмена выбирается материал и его количество для систем аккумуляции в пленочных теплицах в условиях республики, а также определяется соотношение между мощностью внутреннего источника тепловой энергии при максимальном использовании солнечной энергии и количеством теплоаккумулирующего материала.

3. Существует возможность работы системы с частичным накоплением и аккумуляцией, при котором более эффективно используется грунт и теплообменники, что приводит к большему росту растений в теплицах.

## Литература

1. Ганюта А. Г. Математическая модель системы подпочвенного аккумуляции тепловой энергии для обогрева пленочных теплиц // Экология и сельскохозяйственная техника. — Санкт-Петербург, 2000. — С. 66-71.

2. Baille A., Boulard Th. Soil heat storage in greenhouse // Greenhouse heating with solar energy / CNRE Study Montfavet, 1987. — № 1. — P. 135-138.