

УДК 631.53.033*51-76

UDC 631.53.033*51-76

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ
ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ КОНТЕЙНЕРА
ДЛЯ ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА****THE ANALYTICAL DESCRIPTION OF
THERMAL STATE OF A CONTAINER FOR
SEEDLINGS**

Цепляев Алексей Николаевич
к.с.-х.н., заместитель генерального директора
ООО "Объединенные питомники", 396945, Рос-
сия, Воронежская область, Семилукский район, с.
Приволье, ул. Речная, 28. тел. +7 (473) 251 51 84,
www.vsepitomniki.ru
e-mail: vsepitomniki@mail.ru
vsealexey@mail.ru

Tseplyaev Alexey Nikolaevich
Cand.Agr.Sci., Deputy general director
"United nursery-gardens" (Limited Liability Compa-
ny), 396945, Russia the Voronezh region, Semiluksky
r. village Privole, Rechnaya, 28. Ph. +7 (473) 251 51
84, www.vsepitomniki.ru
e-mail: vsepitomniki@mail.ru
vsealexey@mail.ru

Разработано аналитическое описание изменения с течением времени температурного распределения в контейнере для посадочного материала. Аналитическая формула получена путем математической обработки экспериментальных данных о распределении температуры на поверхности контейнера и внутри субстрата

The analytical description of the change of the temperature distribution in the container for planting during time has been created. The analytical formula is derived by the way of mathematical processing of the experimental data of the temperature distribution on the surface of the container and inside the substrate

Ключевые слова: КОНТЕЙНЕР ДЛЯ ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА, СЕЯНЕЦ, СУТОЧНЫЙ ЦИКЛ, АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ, МЕТОД НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

Keywords: CONTAINERS FOR PLANTING MATERIAL, SEEDLING, DAILY CYCLE, ANALYTICAL DESCRIPTION, LEAST SQUARES

Применение пластиковых контейнеров для выращивания посадочного материала в питомниках, получившее широкое распространение в последние десятилетия, с одной стороны принесло решение многих проблем агротехники, таких как увеличение сроков посадочного сезона, увеличение сохранности растений при транспортировке [1], удобство размещения саженцев на торговых площадках и многих других. С другой стороны, данная технология обнажила ряд физиологических проблем, которые были несвойственны для грунтового производства сеянцев и саженцев в питомниках.

Растения, выращиваемые в пластиковых контейнерах различного объема, в условиях южных районов подвергаются воздействию критически высоких температур [2,3,4]. Степень толерантности растений к высокой температуре обусловлена генотипически и варьирует у разных видов в широком диапазоне [4,5]. Обширные экспериментальные данные по изуче-

нию влияния критических температур на жизнедеятельность растений в горшках [4,5,6] показывают, что при увеличении температуры субстрата от 35 до 40°C ряд происходит повреждение клеточных мембран и нарушение синтеза белка. При температуре 49.1 - 50.5°C у таких растений как, *Pitosporum tobira* (Смолосемянник обыкновенный)[6], *Plex crenata 'Helleri'*, Падуб японский 'Helleri' [7], *Illicium parviflorum* (Бадьян мелкоцветковый) [8] в течение 15 минут полностью прекращается синтез важнейших белков в корнях.

К настоящему времени нами накоплен обширный экспериментальный материал о распределении температуры на поверхности контейнера и в субстрате, о суточном изменении распределения температуры и о распределении температуры для контейнеров различных типов (для одинарного, и для нескольких типов двойных). Полученные экспериментальные данные могут быть обобщены путем получения определенной аналитической формулы. Формула позволит рассчитать температуру в различных точках на поверхности контейнера. Характер формулы будет соответствовать физическим закономерностям освещения и нагрева контейнера. Такая аналитическая формула будет содержать несколько параметров, которые могут быть найдены по представленным выше экспериментальным данным. Данную формулу можно будет использовать для задания граничных условий в разработанной нами ранее математической модели теплопереноса.

Целью настоящей работы является разработка аналитического описания изменения распределения температуры по поверхности контейнера конической формы, и определение параметров аналитического описания на основе экспериментальных данных.

Формула должна позволить найти температуру стенки контейнера T_K в зависимости от текущего времени t (при моделировании тепловых явлений в контейнере наиболее удобной единицей измерения времени является

час) и от угла отклонения анализируемой точки контейнера в горизонтальной плоскости от направления север (рис. 1, а), то есть, необходимо получить функцию $T_K(t, \varphi)$. При этом примем допущение, что температура не зависит от высоты расположения пробной точки на стенке контейнера.

Будем считать, что температура внешней стенки контейнера T_K складывается из температуры окружающего воздуха T_B и добавочной температуры ΔT_C , обусловленной нагревом контейнера солнечным излучением:

$$T_K(t, \varphi) = T_B(t) + \Delta T_C(t, \varphi). \quad (1)$$

В первом приближении температуру окружающего воздуха можно считать меняющейся в течение суток по гармоническому закону:

$$T_B(t) = T_{B \min} + (T_{B \max} - T_{B \min}) \cdot \cos\left(2\pi \frac{t - t_{B \max}}{24}\right) \quad (2)$$

где $T_{B \min}$ и $T_{B \max}$ – минимальная и максимальная в течение суток температура воздуха вблизи контейнера; $t_{B \max}$ – время, в которое наблюдается максимум температуры (около 13 ч, более точно данный параметр определяется при решении задачи аппроксимации).

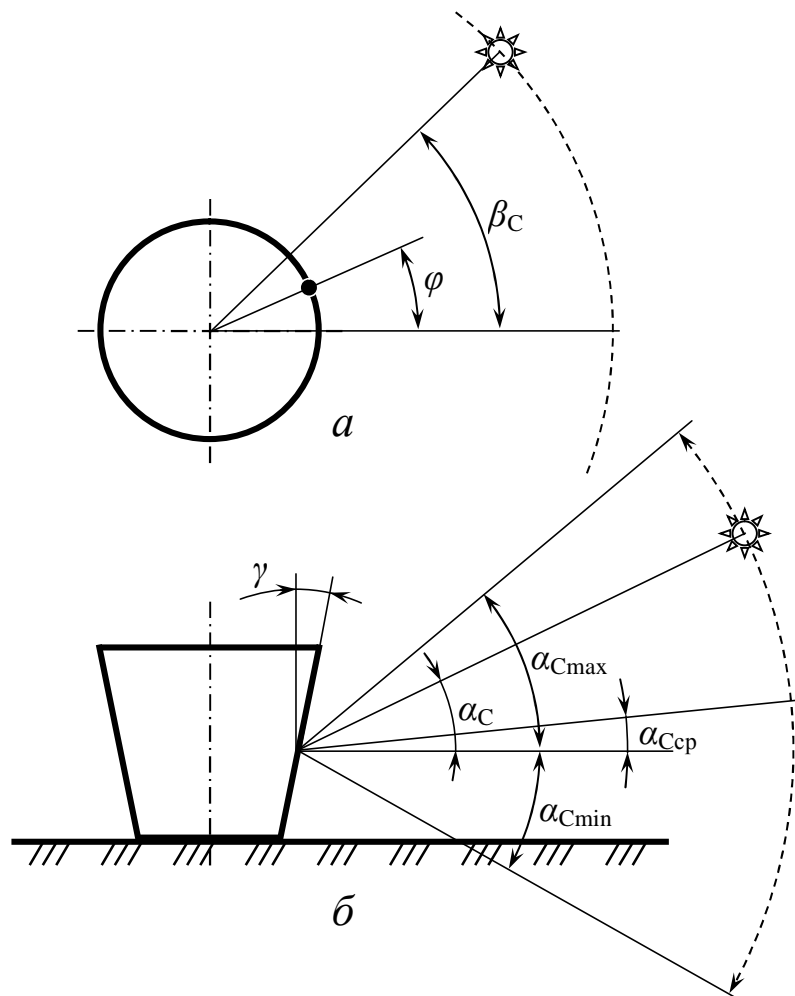


Рис. 1. Схема освещения контейнера солнечным светом: *a* – вид сверху; *б* – вид сбоку

Добавочную температуру будем считать пропорциональной интенсивности освещения поверхности контейнера:

$$\Delta T_c(t, \varphi) = k_1 \cdot I(t, \varphi), \tag{3}$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности, определяемый по экспериментальным данным в ходе решения задачи аппроксимации.

Интенсивность освещения поверхности контейнера зависит от угла между направлением падающего света и поверхностью стенки контейнера:

$$I(t, \varphi) = \begin{cases} I_0(t) \cdot \cos(\beta_C(t) - \varphi) \cdot \cos(\alpha_C(t) + \gamma), & \text{если } |\beta_C(t) - \varphi| < 90^\circ; \\ 0, & \text{если } |\beta_C(t) - \varphi| > 90^\circ, \end{cases} \quad (4)$$

где $I_0(t)$ – интенсивность солнечного света при падении на перпендикулярную плоскость; α_C и β_C – соответственно углы падения солнечного света, измеряемые от поверхности Земли в вертикальной плоскости и от направления на север в горизонтальной плоскости; γ – угол наклона стенки контейнера к вертикали.

В последней формуле углы освещения $\alpha_C(t)$ и $\beta_C(t)$, а также базовая интенсивность освещения $I_0(t)$ изменяются с течением времени. В первом приближении их изменение также может быть описано периодическими функциями:

$$\alpha_C(t) = \alpha_{C\min} + (\alpha_{C\max} - \alpha_{C\min}) \cdot \cos\left(2\pi \frac{t - t_{C\max}}{24}\right); \quad (5)$$

$$\beta_C(t) = \beta_{C0} + 2\pi \frac{t}{24}; \quad (6)$$

$$I_0(t) = \begin{cases} k_C \cdot \sin(\alpha_C), & \text{если } \alpha_C > 0; \\ 0, & \text{если } \alpha_C \leq 0, \end{cases} \quad (7)$$

где $\alpha_{C\min}$ и $\alpha_{C\max}$ – минимальный и максимальный углы в вертикальной плоскости между направлением на Солнце и поверхностью Земли в исследуемой точке; $t_{C\max}$ – момент времени, при котором угловое положение Солнца над плоскостью горизонта максимально; β_{C0} – угол в горизонтальной плоскости между направлением на Солнце и направлением на север при котором угловое положение Солнца над плоскостью горизонта максимально; k_C – коэффициент пропорциональности.

При подстановке зависимостей (2 – 7) в (1) получаем следующую аналитическую формулу для определения $T_K(t, \varphi)$:

$$T_K(t, \varphi) = T_{B \min} + (T_{B \max} - T_{B \min}) \cdot \cos\left(2\pi \frac{t - t_{B \max}}{24}\right) +$$

$$+ \begin{cases} k_{IC} \cdot \sin\left(\alpha_{C \min} + (\alpha_{C \max} - \alpha_{C \min}) \cdot \cos\left(2\pi \frac{t - t_{C \max}}{24}\right)\right) \cdot \cos\left(\beta_{C0} + 2\pi \frac{t}{24} - \varphi\right) \times \\ \times \cos\left(\alpha_{C \min} + (\alpha_{C \max} - \alpha_{C \min}) \cdot \cos\left(2\pi \frac{t - t_{C \max}}{24}\right) + \gamma\right) \\ 0, \text{ если } \left|\beta_{C0} + 2\pi \frac{t}{24} - \varphi\right| < 90^\circ \text{ и } \alpha_{C \min} + (\alpha_{C \max} - \alpha_{C \min}) \cdot \cos\left(2\pi \frac{t - t_{C \max}}{24}\right) > 0; \\ 0, \text{ если } \left|\beta_{C0} + 2\pi \frac{t}{24} - \varphi\right| \geq 90^\circ \text{ или } \alpha_{C \min} + (\alpha_{C \max} - \alpha_{C \min}) \cdot \cos\left(2\pi \frac{t - t_{C \max}}{24}\right) \leq 0. \end{cases} \quad (8)$$

где $k_{IC} = k_I \cdot k_C$ – обобщенный коэффициент освещенности.

Полученная формула имеет восемь параметров ($T_{B \min}$, $T_{B \max}$, $t_{B \max}$, k_{IC} , $\alpha_{C \min}$, $\alpha_{C \max}$, $t_{C \max}$, β_{C0}), которые сложно задать априори (легко может быть определен только один параметр γ , который для исследуемых контейнеров составляет около 6°). Данные параметры могут быть определены на основе обработки представленных выше экспериментальных данных. Для этого необходимо поставить следующую обратную задачу: так подобрать параметры $T_{B \min}$, $T_{B \max}$, $t_{B \max}$, k_{IC} , $\alpha_{C \min}$, $\alpha_{C \max}$, $t_{C \max}$, β_{C0} , чтобы формула давала значения температуры $T_K(t, \varphi)$, как можно более близкие к набору экспериментальных данных $T_{Ki}(t_i, \varphi_i)$. Для численной характеристики "близости" используется метод наименьших квадратов [9–11]: суммарное квадратичное отклонение S аналитической зависимости от экспериментальных данных должно быть минимальным:

$$S = \sum_{i=1}^N \left(T_K^{\text{аналит.}}(t_i, \varphi_i) - T_{Ki}^{\text{табл.}}\right)^2 \rightarrow \min, \quad (9)$$

где i – номер измерения; N – количество измерений температуры T_K в разное время и при разных углах на контейнере; $T_K^{\text{аналит.}}$ – значение температуры стенки контейнера, определенное по предложенной аналитической зависимости путем подстановки соответствующих значений t_i и φ_i для i -го измерения; $T_K^{\text{табл.}}$ – табличное значение температуры для i -го измерения.

Для определения параметров формулы (8) будем использовать экспериментальные данные для двойного контейнера 5 в 10 л, в котором обеспечивается хорошее тепловое разделение смежных стенок контейнера из-за широкой прослойки воздуха между ними (табл. 1).

Табл. 1. Температура $T_k(t, \varphi)$ наружной стенки двойного контейнера 5 л в 10 л, в зависимости от времени измерения и угла между точкой измерения и северным направлением.

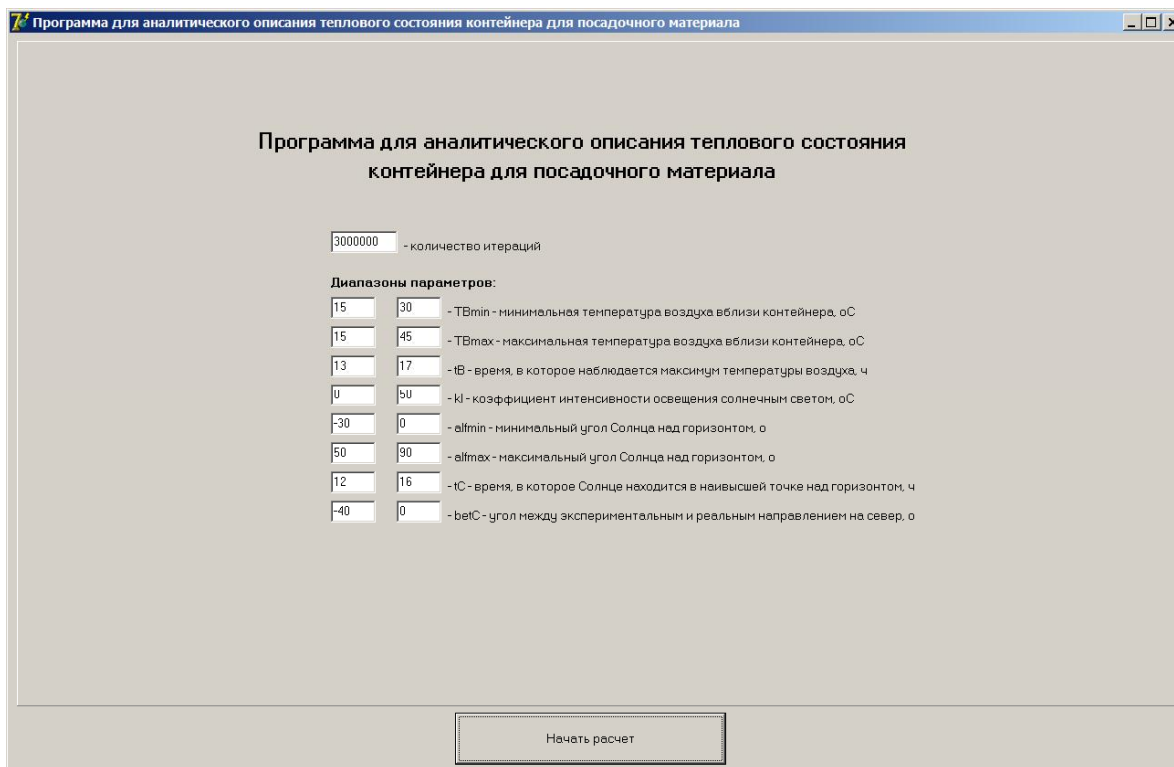
$t, \text{ч}$	$\varphi, \text{градусы}$			
	0	90	180	270
9	27,8	41,6	26,7	25,2
11	32,7	36,9	32,6	31,2
13	36,0	37,4	39,8	36,2
15	34,0	37,9	52,4	42,7
17	34,0	30,8	48,2	52,6
19	31,2	31,1	33,0	43,0

Определение параметров формулы (8) производилось с помощью специально разработанной компьютерной программы на языке Object Pascal в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7 (рис. 2). Поиск параметров производился методом полного перебора. Количество итераций составляло 300 000 000. Диапазоны параметров были следующими:

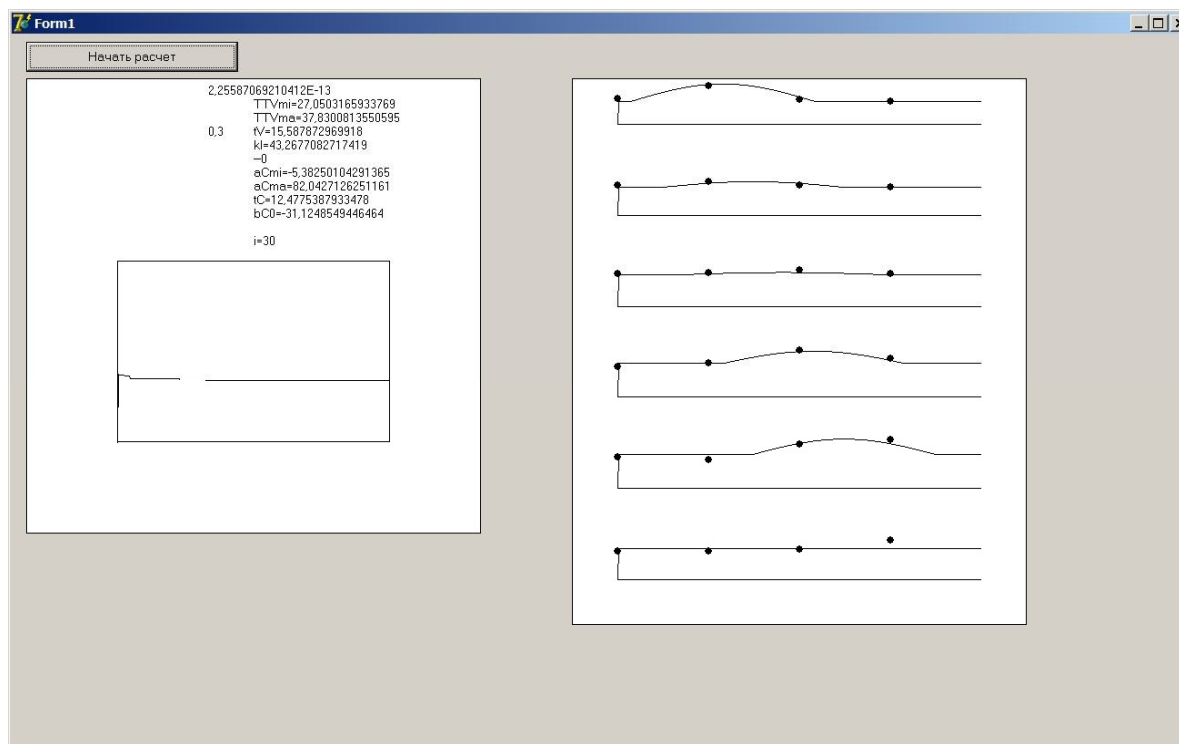
$$15^{\circ}\text{C} < T_{\text{Bmin}} < 30^{\circ}\text{C}; T_{\text{Bmin}} < T_{\text{Bmax}} < T_{\text{Bmin}} + 25^{\circ}\text{C}; 13 < t_{\text{Bmax}} < 17 \text{ ч};$$

$$0 < k_{\text{TC}} < 50; -30^{\circ} < \alpha_{\text{Cmin}} < 0^{\circ}; 50^{\circ} < \alpha_{\text{Cmax}} < 90^{\circ}; 12 < t_{\text{Cmax}} < 16 \text{ ч};$$

$$-40^{\circ} < \beta_{\text{C0}} < 0^{\circ}.$$



a



б

Рис. 2. Интерфейсные формы ввода исходных данных (а) и вывода результатов аппроксимации (б) в "Программе для аналитического описания теплового состояния контейнера для посадочного материала"

Определенные с помощью метода полного перебора параметры следующие: $T_{Bmin} = 27,1^{\circ}C$; $T_{Bmax} = 37,8^{\circ}C$; $t_{Bmax} = 15,6$ ч; $k_{IC} = 43,3^{\circ}C$; $\alpha_{Cmin} = -5,4^{\circ}$; $\alpha_{Cmax} = 82,0^{\circ}$; $t_{Cmax} = 12,5$ ч; $\beta_{C0} = -31,1^{\circ}$. Данные значения не противоречат физическому смыслу переменных и характеру описываемых физических процессов. Так, судя по полученным значениям, эффективная температура воздуха в течение суток изменяется от $27,1$ до $37,8^{\circ}C$. Момент времени, в который воздух прогрет лучше всего составляет $15,6$ ч. Максимальная добавочная температура, обусловленная солнечным освещением, составляет $43,3^{\circ}C$, однако реально температура поднимается на меньшее значение по отношению к температуре воздуха из-за того, что солнечный свет падает под углом. Солнце в течение летних суток уходит ночью на $5,4^{\circ}$ ниже горизонта и поднимается днем на $82,0^{\circ}$ над горизонтом (в реальности диапазон углов направления на Солнце несколько другой, однако формула учитывает некоторую не горизонтальность расположения контейнера, участвующего в испытаниях). Момент времени, в который Солнце находится в вершине своей траектории составляет $12,5$ ч. По результатам расчета, в момент времени 0 ч Солнце расположено под углом $31,1^{\circ}$ к северному направлению.

При подстановке найденных параметров формула (8) принимает следующий вид:

$$T_K(t, \varphi) = 27,1 + 10,7 \cdot \cos\left(2\pi \frac{t-15,6}{24}\right) + \left\{ \begin{array}{l} 43,3 \cdot \sin\left(-5,4^{\circ} + 87,4^{\circ} \cdot \cos\left(2\pi \frac{t-12,5}{24}\right)\right) \cdot \cos\left(-31,1^{\circ} + 2\pi \frac{t}{24} - \varphi\right) \times \\ \times \cos\left(-5,4^{\circ} + 87,4^{\circ} \cdot \cos\left(2\pi \frac{t-12,5}{24}\right) + 6^{\circ}\right) \\ \text{если } \left| -31,1^{\circ} + 2\pi \frac{t}{24} - \varphi \right| < 90^{\circ} \text{ и } -5,4^{\circ} + 87,4^{\circ} \cdot \cos\left(2\pi \frac{t-12,5}{24}\right) > 0; \\ 0, \text{ если } \left| -31,1^{\circ} + 2\pi \frac{t}{24} - \varphi \right| \geq 90^{\circ} \text{ или } -5,4^{\circ} + 87,4^{\circ} \cdot \cos\left(2\pi \frac{t-12,5}{24}\right) \leq 0. \end{array} \right. \quad (10)$$

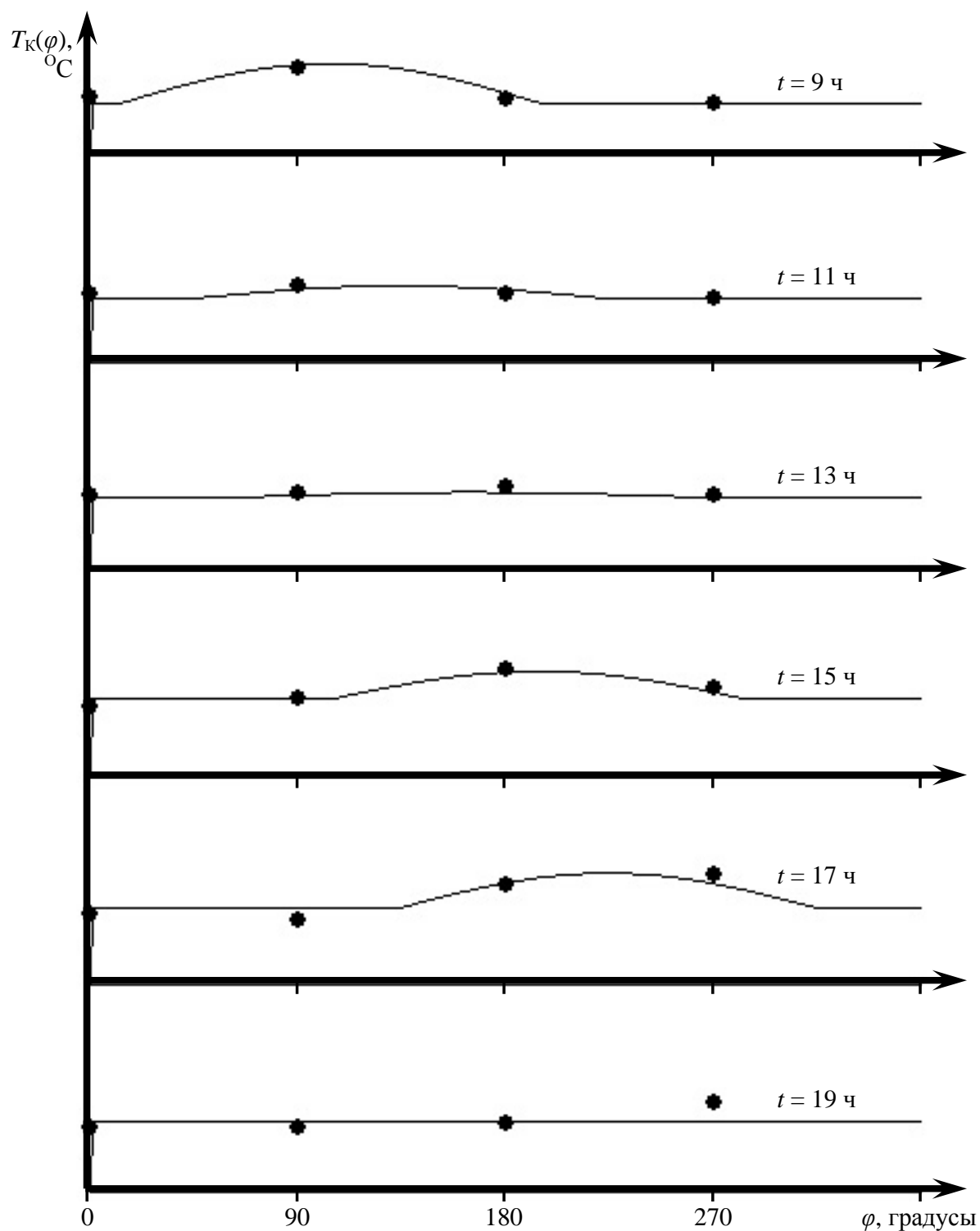


Рис. 3. Зависимости температуры T_k поверхности контейнера 5 л в 10 л от угла по отношению к северному направлению φ в разные моменты времени t : точками изображены экспериментальные данные, сплошная кривая – результаты расчета по формуле (10)

Качество описания формулой экспериментальных данных можно проиллюстрировать серией графиков (рис. 3). Как видно из графиков, сплошная теоретическая кривая очень близка к экспериментальным точкам. В момент времени $t = 9$ ч температура воздуха низка, однако низко расположенное над горизонтом Солнце освещает поверхность контейнера практически под прямым углом, поэтому на графике $T_k(\varphi)$ хорошо выделяется пик примерно при $\varphi = 110^\circ$. В 11 и в 13 ч Солнце высоко расположено над горизонтом, поэтому падает почти касательно на поверхность контейнера, и вызывает лишь слабый радиационный нагрев. С другой стороны к этому времени хорошо прогревается воздух, поэтому кривая $T_k(\varphi)$ в целом поднимается. Начиная с $t = 15$ ч, солнце опускается над горизонтом, лучше освещая поверхность контейнера; при этом температура воздуха еще несколько повышается. Поэтому при $t = 15$ и $t = 17$ ч при некотором угле φ достигается максимум температуры, опасный для корневой системы саженца. В 19 ч Солнце практически садится, поэтому соответствующая кривая $T_k(\varphi)$ является горизонтальной (хотя экспериментальная точка при $\varphi = 270^\circ$ несколько поднята). Поэтому полученная формула с высокой степенью точности описывает изменение температуры стенки контейнера по его поверхности и с течением времени.

Таким образом, в рамках данной работы разработано аналитическое описание изменения в суточном цикле температурного распределения на стенке контейнера для посадочного материала. Данное аналитическое описание может быть использовано в качестве граничных условий при моделировании тепловых процессов в субстрате внутри контейнера, а также в модели развития корневой системы сеянца.

Список литературы

1. Whitcomb, C.E. Plant production in containers / C.E. Whitcomb. - Lacebark Publications Inc., Stillwater, OK, 1984. - 633 с.

2. Gur, A. The influence of root temperature on apple trees. II. Clonal differences in susceptibility to damage caused by supraoptimal root temperature / A. Gur , Y. Mizirahi, R.M Samish. - J. Hort. Sci. 51, 1976. – с. 195-202.
3. Ingram, D. L. Characterization of temperature fluctuations and woody plant growth in white poly bags and conventional black containers / D. L. Ingram. – HortScience, 1981. 16. - с. 762-763.
4. Young, K. Temperature patterns in exposed black polyethylene plant containers / K. Young, D. R. Hammett. - Agr. Mererol. 21, 1980.- с. 165-172.
5. Ingram, D. L. Measurement of direct heat injury of roots of three woody plants / D. L. Ingram, D. Buchanan. – Hort Science, 1981. – с. 769-771.
6. Ingram, D. L. Modeling high temperature and exposure time interactions on *Pitosporum tobira* Thunb. root cell membrane thermostability / D. L. Ingram. - J. Am. Soc. Hort. Sci. 110, 1985. – с. 470-473.
7. Ingram, D. L. Heat tolerance of root cell membranes of two holly species / D. L. Ingram. - J. Am. Soc. Hort. Sci., 1985. 111 (2), 270-272.
8. Ingram, D. L. Interactions of exposure time and temperature on thermostability and protein content of excised *Illicium parviflorum* roots / D. L. Ingram, G. W. Patricia, R. H. Patricia. - Biggs Plant and Soil, 1986. 96 – с. 69-76.
9. Королев, Ю. Г. Метод наименьших квадратов в социально-экономических исследованиях / Ю. Г. Королев. – М.: Статистика, 1980. – 112 с.
10. Емельянов, И. П. Форма колебаний в биоритмологии / И. П. Емельянов. – Новосибирск: Наука, 1976. – 50 с.
11. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. – М.: Мир, 1976. – 757 с.
12. Инженерные расчеты на ЭВМ: Справочное пособие / ред.: В.А. Троицкий. – Л.: Машиностроение, 1979. – 288 с.

References

1. Whitcomb, C.E. Plant production in containers / C.E. Whitcomb. - Lacebark Publications Inc., Stillwater, OK, 1984. - 633 p.
2. Gur, A. The influence of root temperature on apple trees. II. Clonal differences in susceptibility to damage caused by supraoptimal root temperature / A. Gur, Y. Mizirahi, R.M Samish. - J. Hort. Sci. 51, 1976. - With. 195-202.
3. Ingram, D. L. Characterization of temperature fluctuations and woody plant growth in white poly bags and conventional black containers / D. L. Ingram. - HortScience, 1981. 16. - With. 762-763.
4. Young, K. Temperature patterns in exposed black polyethylene plant containers / K. Young, D. R. Hammett. - Agr. Mererol. 21, 1980. - P. 165-172.
5. Ingram, D. L. Measurement of direct heat injury of roots of three woody plants / D. L. Ingram, D. Buchanan. - Hort Science, 1981. - C. 769-771.
6. Ingram, D. L. Modeling high temperature and exposure time interactions on *Pitosporum tobira* Thunb. root cell membrane thermostability / D. L. Ingram. - J. Am. Soc. Hort. Sci. 110, 1985. - C. 470-473.
7. Ingram, D. L. Heat tolerance of root cell membranes of two holly species / D. L. Ingram. - J. Am. Soc. Hort. Sci., 1985. 111 (2), 270-272.
8. Ingram, D. L. Interactions of exposure time and temperature on thermostability and protein content of excised *Illicium parviflorum* roots / D. L. Ingram, G. W. Patricia, R. H. Patricia. - Biggs Plant and Soil, 1986. 96 - p. 69-76.
9. Korolev, G. Least squares in the socio-economic of investigations / Yuri Korolev. - M.: Statistics, 1980. - 112 p.

10. Emelyanov, IP shape oscillations in biorhythmology / IP Emelyanov. - Novosibirsk: Nauka, 1976. - 50 s.
11. T.W. Anderson, The statistical analysis of time series. - Academic Press, 1976. - 757 p.
12. Engineering calculations on a computer: A Reference Guide / ed.: VA Trinity. - L: Mechanical Engineering, 1979. - 288.