

УДК 631.53.033\*51-76

UDC 631.53.033\*51-76

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНТЕЙНЕРЕ ДЛЯ СЕЯНЦЕВ**

**MODELING OF THERMAL PROCESSES IN A CONTAINER FOR SEEDLINGS**

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

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

Разработана методика моделирования тепловых процессов в контейнере для посадочного материала. Получена информация о распределении температуры внутри контейнера. Проведен сравнительный анализ одинарных и двойных (pot-in-pot) контейнеров

The technique of simulation of thermal processes in a container planting has been presented. The information about the distribution of the temperature inside the container has been obtained. The comparative analysis of single and double (pot-in-pot) containers has been done.

Ключевые слова: МОДЕЛИРОВАНИЕ, ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ, КОНТЕЙНЕР ДЛЯ ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА, СЕЯНЕЦ

Keywords: SIMULATION, THERMAL PROCESSES, CONTAINERS FOR PLANTING MATERIAL, SEEDLING

В последние годы в нашей стране и за рубежом получил широкое распространение контейнерный способ выращивания посадочного материала в условиях древесно-декоративных питомников. По сравнению с грунтовым способом он имеет ряд преимуществ [1]. К ним можно отнести: большую сохранность корневой системы при доставке посадочного материала на место высадки [2], увеличение календарного диапазона посадки, контейнерное производство не требует выкопки, таким образом сокращая затраты на оборудование и рабочую силу [3].

Однако данный способ выращивания имеет свои недостатки, такие как: необходимость частых поливов и подкормок, высокие затраты на первоначальное оборудование площадок (ирригационные сооружения, шпалеры, притеночные конструкции и др.). Корневая система сеянца в контейнере, в отличие от грунтового способа выращивания, в большей мере подвержена температурным воздействиям извне, так как стенки контейнера контактируют с воздушной средой и испытывают нагрев при попадании солнечного освещения [4]. В процессе онтогенеза, в отличие от кроны, корневая система растений в почве не испытывает резких колебаний тем-

пературы. Применение контейнеров из пластика с тонкими стенками, для выращивания посадочного материала, приводит к тому, что корни, расположенные с южной стороны нагреваются до  $50^{\circ}\text{C}$  и более. Подобные критические температурные воздействия приводят к нарушению таких важнейших физиологически процессов как: фотосинтез, дыхание, транспирация и др. В жестких зимних условиях Центральной полосы России наблюдается так же проблема резкого понижения температуры в течение суток.

Данные факторы при контейнерном способе выращивания вызывают необходимость принимать специальные меры, для того, чтобы температура корневой системы находилась в благоприятном диапазоне, была равномерной в пределах контейнера и не испытывала существенных изменений в течение суток.

С целью преодоления неблагоприятного воздействия среды на растения в горшках, американские ученые, в конце 20 века разработали систему Pot-in-Pot (PiP) (горшок в горшке) [5], которая представляет собой гибрид контейнерного и грунтового выращивания. «Контейнер-гнездо» (КГ) помещается в грунт или устанавливается на специально подготовленную площадку. В КГ помещается «контейнер-вставка», в который насыпается субстрат и высаживается растение. Данная конструкция позволяет создать воздушную прослойку между внешней средой и корневой системой.

Следует отметить, что использование подобных технологий в нашей стране только начинается, в связи с чем, требуется всестороннее изучение влияния внешних факторов на температуру корневой системы в контейнере, а также разработка математических моделей, позволяющих представить тепловые процессы, происходящие в субстрате в контейнере, в материале контейнера, и в окружающей среде [6]. Модель, разработанная в данном исследовании, предоставляет возможность проверить эффективность различных мер, направленных на обеспечение равномерности рас-

пределения температуры по объему контейнера и постоянства температуры в течение суток. Исследования проводились в условиях производственного питомника (ООО «Объединенные питомники», Воронежская область).

Моделирование распространения тепла внутри контейнера является чрезвычайно сложной задачей [7]. Сложность обусловлена необходимостью воспроизвести реальную форму контейнера, а также двойного контейнера "pot in pot"; необходимостью учета как минимум пяти сред (грунт в контейнере, грунт опорной поверхности, материал контейнера, воздух между стенками контейнера, окружающий атмосферный воздух); сложностью граничных условий и их изменения с течением времени (контейнер находится в тепловом контакте с окружающим воздухом, температура которого меняется с течением времени, нагревается излучением солнца, перемещающегося в течение суток по отношению к контейнеру).

В основу модели положены базовые уравнения классической термодинамики, а сложность задачи преодолевается использованием дискретизации пространства (и соответственно использованием численных методов расчета), а также использованием алгоритмизации и программирования для учета сложных внешних условий [8, 9]. Распространение тепла в трехмерном случае описывается уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial}{\partial t} T(\mathbf{r}, t) = (\nabla, c(\mathbf{r}, t) \nabla T(\mathbf{r}, t)) + Q(\mathbf{r}, t), \quad (1)$$

где  $T(\mathbf{r}, t)$  – искомое распределение температуры и его зависимость от времени;  $\mathbf{r}$  – радиус вектор исследуемой точки пространства;  $t$  – время;

$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$  – оператор набла;  $x, y, z$  – декартовы координаты исследуемой точки пространства;  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  – единичные векторы декартова пространства;  $(\cdot, \cdot)$  – скалярное произведение;  $c(\mathbf{r}, t)$  – коэффициент температуропроводности вещества, зависящий от положения в пространстве и от времени;  $Q(\mathbf{r}, t)$  – поступление тепла от внешней среды, зависящее от положения в пространстве и от времени. Необходимо отметить, что коэффициент температуропроводности выражается через коэффициенты теплопроводности  $\kappa$ , теплоемкости  $c$  и плотность вещества  $\rho$  следующим образом:  $\chi = \kappa / (c \cdot \rho)$ .

Уравнение (1) является чрезвычайно сложным и допускает аналитическое решение лишь в простейших случаях (одномерное приближение, простые геометрические формы, постоянный коэффициент теплопроводности и т.д.). Поэтому для исследуемого в настоящей работе объекта решение уравнения (1) сразу ориентируется на использование сеточных конечно-разностных численных методов [8, 9].

Для максимально полной передачи в модели формы контейнера фрагмент пространства, в котором производится моделирование, дискретизирован прямоугольной сеткой с шагом  $h = 3$  мм (рис. 1). Протяженность пространства в каждом из трех пространственных направлений  $X, Y, Z$  составляет 100 ячеек сетки (соответствует размеру 300 мм). Таким образом, общее количество ячеек составляет  $100^3 = 1\,000\,000$ .



Рис. 1. Контейнер для посадочного материала: *a* – внешний вид; *б* – представление в модели

При такой дискретизации пространства сетка для решения уравнения теплопроводности имеет следующий вид (рис. 2). Каждая ячейка сетки имеет шесть соседей, от которых возможен прием тепла (либо которым производится передача тепла).

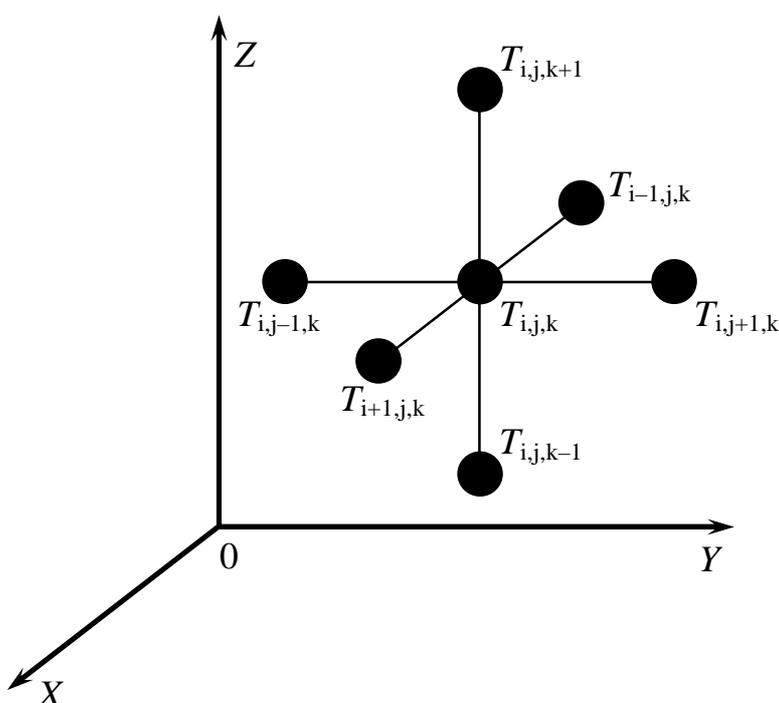


Рис. 2. Учет соседних элементов при сеточном решении уравнения теплопроводности

В конечно-разностной (сеточной) постановке задачи уравнение (1) преобразуется следующим образом. Для каждой ячейки  $(i, j, k)$  на каждом шаге интегрирования температура текущей ячейки  $T_{i,j,k}$  зависит от температуры соседних ячеек следующим образом.

$$\frac{\Delta T_{i,j,k}}{\Delta t} = c_{i,j,k} \left( \frac{\Delta T_{i,j,k}}{\Delta x} + \frac{\Delta T_{i,j,k}}{\Delta y} + \frac{\Delta T_{i,j,k}}{\Delta z} \right) + Q_{i,j,k}. \quad (2)$$

в последнем уравнении  $\Delta t$  – шаг дискретизации по времени;  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = h$  – шаг дискретизации пространства;  $\chi$  – коэффициент теплопроводности;  $Q_{i,j,k}$  – поступление тепла от внешней среды к данной ячейке. Расписывая подробно уравнение (2) получим следующую окончательную расчетную формулу.

$$\frac{T_{i,j,k}^{t+1} - T_{i,j,k}^t}{\Delta t} = \frac{c_{i,j,k}}{h} (T_{i+1,j,k}^t + T_{i-1,j,k}^t + T_{i,j+1,k}^t + T_{i,j-1,k}^t + T_{i,j,k+1}^t + T_{i,j,k-1}^t - 6 \cdot T_{i,j,k}^t) + Q_{i,j,k}. \quad (3)$$

Используя последнюю формулу можно на текущем шаге интегрирования по времени  $\tau$  пересчитать температуру  $T_{i,j,k}^\tau$  каждой ячейки  $(i, j, k)$  для следующего шага интегрирования  $\tau + 1$ .

Задача распространения тепла решается для сред трех типов:

- грунт (грунт в контейнере, и грунт опорной поверхности),

$\chi = 0,15 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;

- пластмасса (материал, из которого изготовлены стенки контейнера),  $\chi = 0,25 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;

- воздух (в зазоре между двумя контейнерами),  $\chi = 0,026 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Тепловая задача не решается для воздуха, окружающего контейнер, так как воздух находится в постоянном движении. По сравнению с характерным временем исследуемых процессов нагрева или охлаждения контейнера (десятки минут, часы), воздух существенно быстрее выравнивает свою температуру (секунды, десятки секунд) в результате конвекции и обтекания контейнера ветром. Поэтому все ячейки сетки, в которых геометрически находится атмосферный воздух (за исключением воздуха в просвете между контейнерами), имеют одинаковую температуру  $T_0$  – температуру воздуха. В процессе компьютерного эксперимента температура  $T_0$  может изменяться для имитации в модели суточного изменения температуры.

Для удобства моделирования разработана компьютерная программа "Программа для моделирования тепловых процессов в контейнере для семян" на языке Object Pascal в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7, которая в настоящее время находится в стадии регистрации в ФСИСПТЗ (рис. 3, 4). Программа предназначена для имитационного моделирования распространения тепла в контейнерах различных типов при различных геометрических условиях и режимах нагревания и охлаждения.

**Функциональные возможности программы:**

- проведение компьютерного эксперимента, в процессе которого изменяется распределение температуры в контейнере и окружающей среде в соответствии с заданным режимом охлаждения или нагрева контейнера;
- задание геометрических параметров контейнера, теплофизических параметров грунта, материала контейнера и воздуха (рис. 3);
- вывод на экран в процессе компьютерного эксперимента топограммы распределения температуры по сечению контейнера, а также графика распределения температуры в контейнере (рис. 4).

**Программа для моделирования тепловых процессов в контейнере для семян**

<b>Форма контейнера</b>		<b>Теплофизические параметры</b>	
<input type="text" value="70"/>	Радиус дна, мм	<input type="text" value="0,043"/>	Теплопроводность воздуха, Вт/(м*К)
<input type="text" value="85"/>	Радиус верхней части, мм	<input type="text" value="0,6"/>	Теплопроводность грунта, Вт/(м*К)
<input type="text" value="20"/>	Положение дна по вертикали, мм	<input type="text" value="0,2"/>	Теплопроводность материала контейнера, Вт/(м*К)
<input type="text" value="140"/>	Положение верхней части по вертикали, мм	<input type="text" value="0,2"/>	Теплоемкость воздуха, кДж/(кг*К)
<input type="text" value="2"/>	Толщина стенки контейнера, мм	<input type="text" value="1,5"/>	Теплоемкость грунта, кДж/(кг*К)
<input type="text" value="2"/>	Толщина дна контейнера, мм	<input type="text" value="1,2"/>	Теплоемкость материала контейнера, кДж/(кг*К)
<b>Параметры компьютерного эксперимента</b>			
<input type="text" value="1"/>	Шаг интегрирования, с		
<input type="button" value="Начать компьютерный эксперимент"/>			

Рис. 3. Форма ввода исходных данных для компьютерного эксперимента в программе для моделирования тепловых процессов в контейнере

Основные технические ограничения программы: шаг интегрирования дифференциальных уравнений не более 1 с; максимальный размер куба дискретизации пространства не более 2 мм. Программа рассчитана на использование компьютера с процессором не ниже Pentium 2,3 ГГц, и объемом оперативной памяти не менее 512 Мбайт. Исходный текст программы имеет объем 11 кбайт.

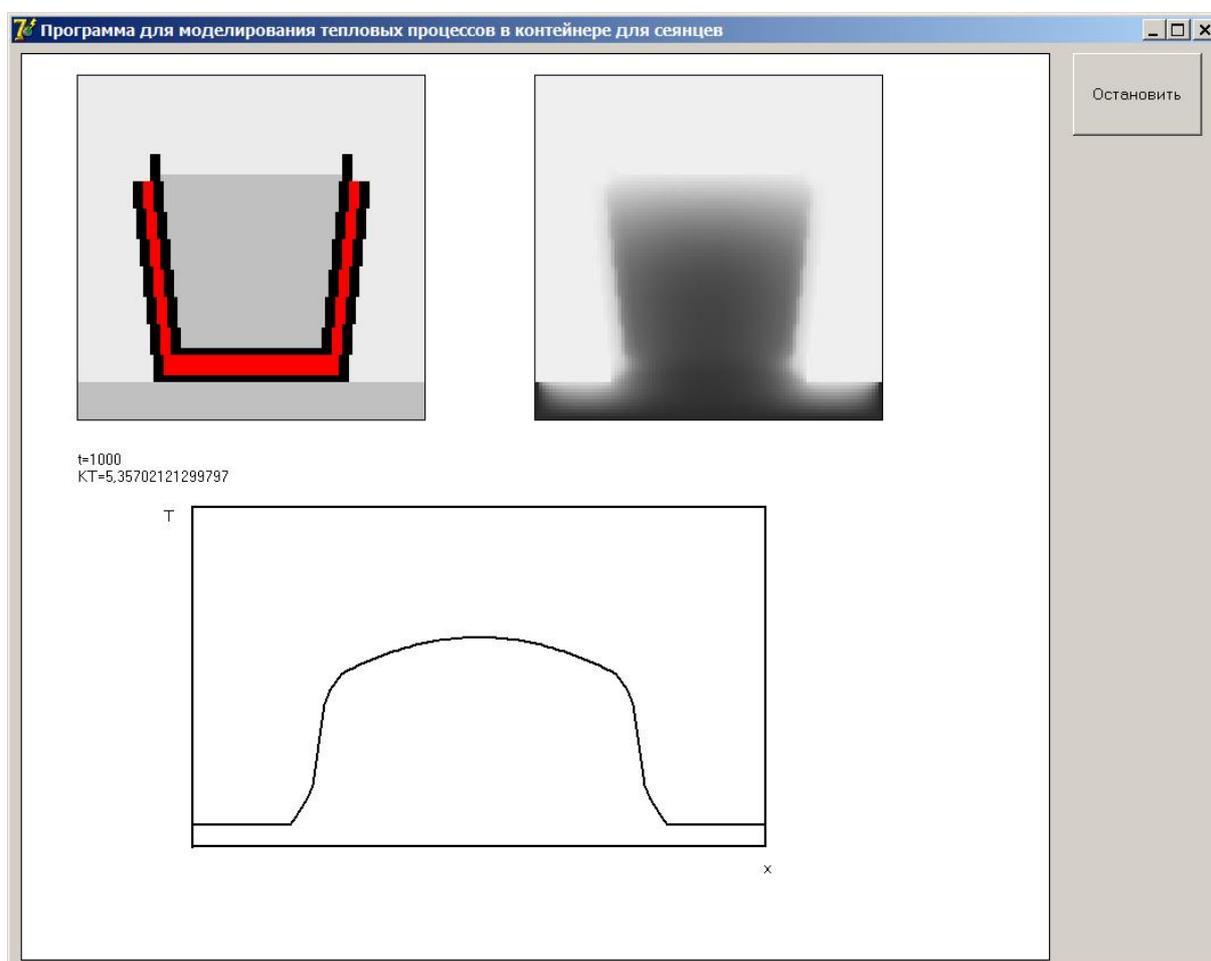


Рис. 4. Вывод результатов компьютерного эксперимента в программе для моделирования тепловых процессов в контейнере.

С помощью разработанной модели, в первую очередь, была произведена проверка особенностей тепловых процессов происходящих в субстрате в обычном и двойном контейнерах при резком изменении темпера-

туры окружающего воздуха. Были проведены два компьютерных эксперимента (соответственно для обычного и двойного контейнера), в которых имитировалось резкое охлаждение окружающего воздуха (с 26 до 3<sup>0</sup>С) [6]. В начальный момент времени температура субстрата, опорной поверхности, стенок контейнера и воздушной прослойки между стенками двойного контейнера была равна начальной температуре 26<sup>0</sup>С. Проводилась имитация охлаждения в течение 4 часов (240 минут). На рис. 5 представлена серия топограмм распределения температуры в сечении XZ системы. Интенсивностью черного цвета показана температура в различных точках системы, при этом черный цвет соответствует температуре 30<sup>0</sup>С, белый цвет соответствует температуре 0<sup>0</sup>С.

После резкого начального изменения температуры окружающего контейнер воздуха начинается постепенный отбор тепла у контейнера с субстратом. Сначала происходит понижение температуры вблизи стенок контейнера. Затем постепенно начинает понижаться средняя температура субстрата. Как видно из топограмм, в двойном контейнере субстрат остывает медленнее, чем в одинарном. Кроме того, если в одинарном контейнере велик разброс температуры в субстрате (в центре температура существенно выше, чем у стенок контейнера), то в двойном контейнере температура в любой момент времени практически однородна по всему объему субстрата.

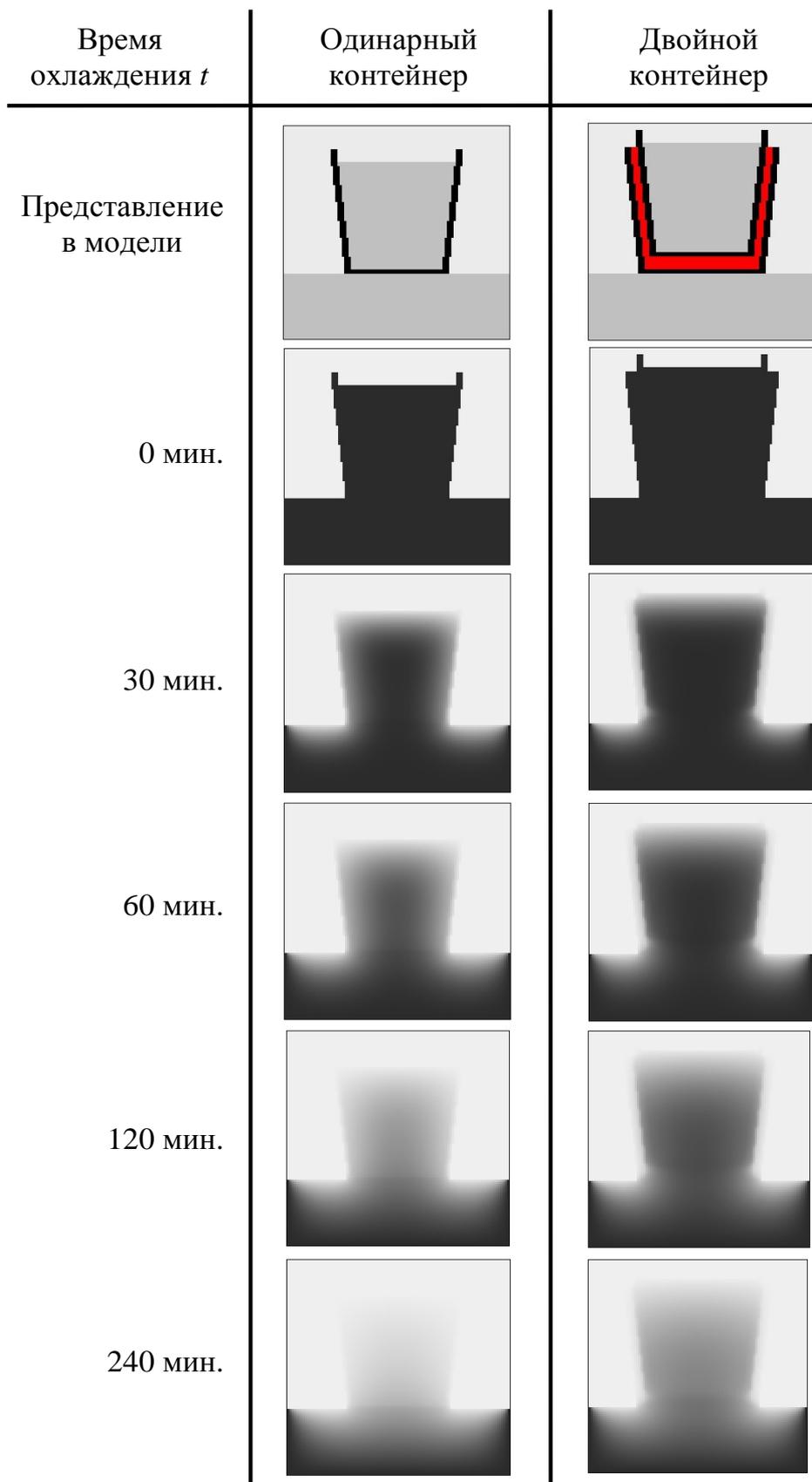


Рис. 5. Изменение распределения температуры для одинарного и двойного контейнеров в процессе охлаждения.

Таким образом, в рамках данной работы получены следующие результаты и выводы. Разработана математическая модель и компьютерная программа, позволяющие получить топограмму распределения температуры внутри контейнера, а также проследить ее изменение с течением времени, в зависимости от внешних условий. Проведен сравнительный анализ характера температурного распределения в одинарном и двойном ("pot-in-pot") контейнерах. Подтверждено преимущество двойного контейнера в плане обеспечения высокой устойчивости и равномерности температуры субстрата при резком изменении температуры окружающего воздуха.

### Список литературы

1. Кабанина, С.В. Контейнерный метод выращивания посадочного материала и перспективность его внедрения в питомники Саратовской области / С.В. Кабанина, М.Ю. Сергадеева, К.В. Балина, О.В. Михайлов, В.Б. Любимов; Под ред. В. Б. Любимова. - Балашов: Изд-во «Николаев», 2004. - 20 с.
2. Жигунов, А.В. Производство контейнеризованных семян. Практические рекомендации / А.В. Жигунов, Ю.Н. Гомельский, Е.Л. Маслаков, А.Н. Чукичев, И.М. Извекова, Т.Н. Васякина, С.Х. Белостоцкая, Н.П. Стенина, Ф.В.Наумов, Е.Е. Подшиваев, Т.И. Козлова, Н.Ф. Мартикайнен. - Ленинград: ЛенНИИЛХ, 1990. - 29 с.
3. Whitcomb, С.Е. Plant production in containers / С.Е. Whitcomb. - Lacebark Publications Inc., Stillwater, OK, 1984. - 633 с.
4. Sibley, J.L. High temperature tolerance of roots of container-grown red maple cultivars / J.L. Sibley, J.M. Ruter, D.J. Eakes. - Proc. Southern Nurserymen's Assoc, 1999. - Res. Conf. 44: 24-28.
5. Parkenson, С.Н. P & P: A new field-type nursery operation. / С.Н. Parkenson. - Proc. Inter. Plant Prop, 1990. - Soc. 40: 417-419.
6. Советов, Б. Я. Моделирование систем: учебное пособие/ Б. Я. Советов, С. А. Яковлев – М.: Высш. шк., 1998. – 319 с.
7. Полянин А. Д. Линейные задачи тепло- и массопереноса: Общие формулы и результаты // Теоретические основы химической технологии. -2000. Т. 34. - №6. - С. 563-574.
8. К проблеме неизотермического массопереноса в пористых средах / Н. Н. Гринчик, П. В. Акулич, П. С. Куц, Н. В. Павлюкевич, В. И. Терехов // Инженерно-физический журнал. 2003. - Т. 76. - №6. - С. 129-142.
9. Инженерные расчеты на ЭВМ: Справочное пособие / Под ред. В.А. Троицкого. – Л.: Машиностроение, 1979. – 288 с.

### References

1. Kabanina, S.V. Container growing method of planting material and prospects of its implementation in the Saratov region nurseries / S.V. Kabanina, M.U. Sergadeeva, K.V. Balin, O. Mikhailov, V.B. Lyubimov, ed. V.B. Lyubimov - Balashov: Publishing House "Nikolaev",

2004. - 20.

2. Zhigunov, A.V. Production of containerized seedlings. Practical recommendations / A.V. Zhigunov, J.N. Gomelsky, E.L. Maslakov, A.N. Chukichev, T.N. Vasyakin, S.H. Belostotskaya, N.P. Stenina, F.V.Naumov, E.E. Hemming, T. Kozlov, N.F. Martikainen. - Leningrad: LenNIILH, 1990. - 29 p.

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

4. Sibley, J.L. High temperature tolerance of roots of container-grown red maple culti-vars / J.L. Sibley, J.M. Ruter, D.J. Eakes. - Proc. Southern Nurserymen's Assoc, 1999. - Res. Conf. 44: 24-28.

5. Parkenson, C.H. P & P: A new field-type nursery operation. / C.H. Parkenson. - Proc. Inter. Plant Prop, 1990. - Soc. 40: 417-419.

6. Councils, BJ systems modeling: a manual / BJ Soviets, S. Yakovlev - Vysshaya. wk., 1998. - 319 p.

7. Polyanin A.D. Linear problems of heat and mass transfer: General formulas and results // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. -2000. T. 34. - № 6. - S. 563-574.

8. The problem of non-isothermal mass transport in porous media / N.N. Grinchik, P.V. Akulich, P.S. Kuts, N.V. Pavlyukevich, V.I. Terekhov // Journal of Engineering Physics. 2003. - T. 76. - № 6. - S. 129-142.

9. Engineering calculations on a computer: A Reference Guide / Ed. V.A. Troitskiy. - L: Mechanical Engineering, 1979. - 288.