

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ЗЕМЛИ

Игорь Шевченко, Алексей Ковязин

Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства» Национальной академии аграрных наук Украины

Украина, г. Запорожье, ул. Энтузиастов, 14

Igor Shevchenko, Aleksey Kovyazin

*National Scientific Center “Institute of Mechanization and Electrification of Agricultural”
NAAS of Ukraine*

Entuziastov Str., 14, Zaporozhye, Ukraine

Аннотация. Разработан алгоритм, позволяющий моделировать природное температурное поле поверхностных слоев Земли для различных природно-климатических условий и грунтов различной теплопроводности. На примере условий Запорожского региона определена глубина годовых колебаний температуры грунта.

Ключевые слова: поверхностный слой Земли, температурное поле, теплопроводность грунта, глубина.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Обеспечение оптимального микроклимата животноводческих помещений требует значительных затрат энергии и средств [1, 2].

Без соблюдения оптимального микроклимата в помещениях, влияние которого состоит из совокупных действий температуры, влажности, газового состава воздуха, загрязнения воздуха, невозможно получить дешевую и качественную продукцию в короткие сроки.

Результаты многочисленных исследований свидетельствуют, что хозяйства, где содержат животных в помещениях с воздухом, в котором концентрация аммиака, сероводорода, углекислого газа, больше допустимой, несут значительные потери от снижения продуктивности животных, повышения уровня смертности, а также перерасхода кормов на единицу продукции [3].

Снижение затрат на обеспечение оптимального микроклимата является одним из путей повышения эффективности отрасли животноводства и возможно за счет использования альтернативных источников энергии, в частности геотермальной энергии.

Для рационального использования энергетического потенциала массива грунта техническими средствами, рабочими органами которых являются грунтовые теплообменники, необходимо определить его температурное поле, формируемое различными факторами (рис. 1).

При этом, прежде всего, необходимо определить природное температурное поле поверхностных слоев Земли (то есть при отсутствии теплового воздействия на массив грунта системы грунтовых теплообменников), которое затем будет учитываться при моделировании технологических процессов технических средств, способных использовать геотермальную энергию.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В [4-10] и многих других источниках приводятся зависимости, по которым возможно определить природное температурное поле поверхностных слоев Земли.

Однако эти зависимости не учитывают потока радиогенного тепла Земли, который для континентальных районов, к которым относится и территория Украины, составляет 65 ± 2 мВт/м² [11], рис. 2 [12] и приводит к равномерному возрастанию температуры грунта в среднем на 3 °С каждые 100 м глубины [13].

В источнике [14] приводится следующее выражение температурного поля поверхностных слоев Земли, в котором может быть учтен поток радиогенного тепла Земли.

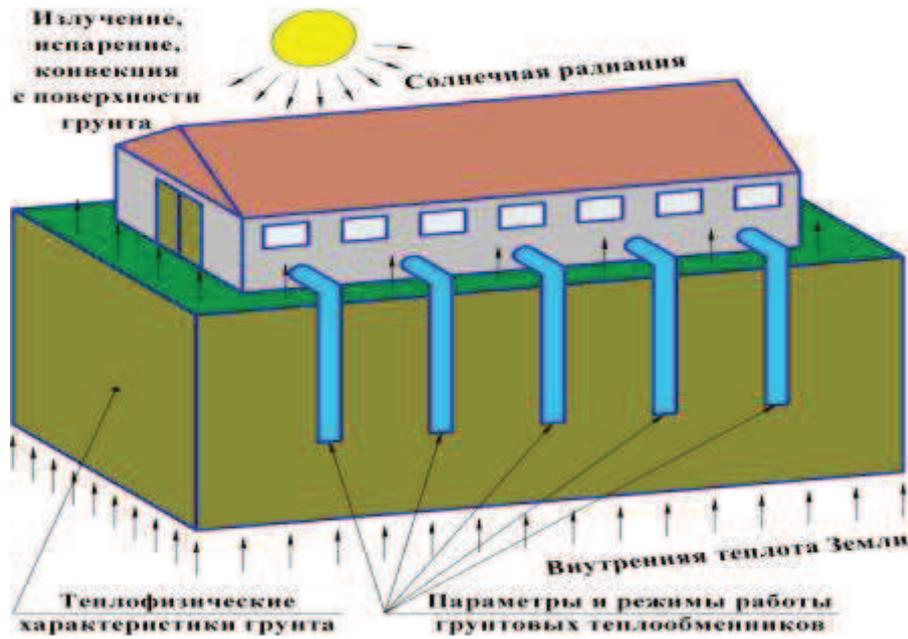


Рис. 1. Факторы, формирующие температурное поле массива грунта
 Fig. 1. Factors shaping the temperature field of soil mass

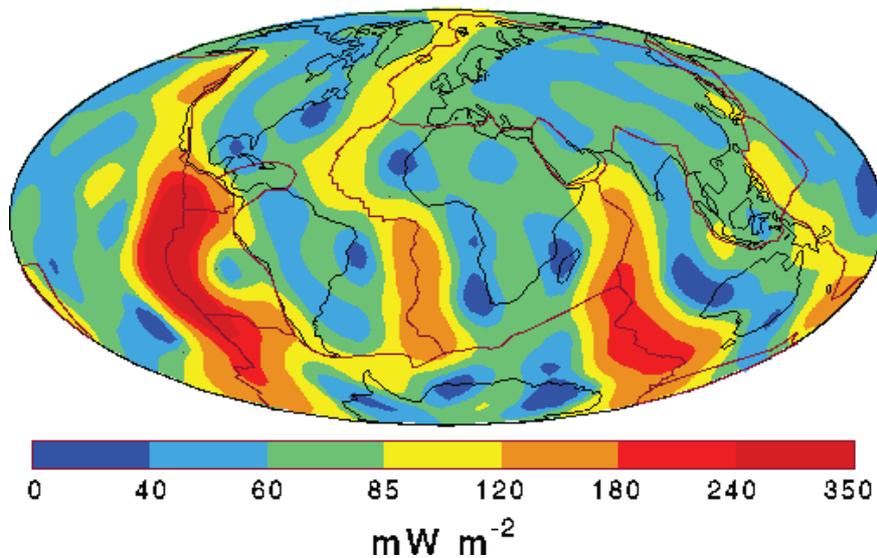


Рис. 2. Глобальное распределение теплового потока на поверхности Земной коры [12]
 Fig. 2. Global distribution of the heat flux on the surface of the Earth's crust [12]

$$T_2(z, t) = A_T e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{a_2 \Theta}}} \sin \left(\frac{2\pi}{\Theta} t - z \sqrt{\frac{\pi}{a_2 \Theta}} \right) + \varphi(z), \quad (1)$$

где: $T_2(z, t)$ – температура грунта на глубине z в момент времени t , °C;

A_T – амплитуда колебаний температуры на поверхности грунта (при $z = 0$), °C;

a_2 – температуропроводность грунта, м²/мес.;

Θ – период колебаний, $\Theta = 12$ мес.;

$\varphi(z)$ – функция, описывающая распределение температуры по глубине грунта в начальный момент времени и которая может учитывать поток радиогенного тепла Земли.

Задача была решена при начальном условии $T_2(z, 0) = \varphi(z)$ и граничных условиях

$$T_z(\infty, t) = 0; \quad T_z(0, t) = A_T \sin\left(\frac{2\pi}{\Theta}t + t_0\right),$$

где: t_0 – начальная фаза.

Однако в этом источнике подробный вывод выражения (1) отсутствует. Кроме того полученное выражение не удовлетворяет начальному условию и граничному условию на поверхности грунта, в чем можно убедиться непосредственной подстановкой.

Таким образом, в настоящее время проблема решена не полностью.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Смоделировать природное температурное поле поверхностных слоев Земли.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Моделирование процессов теплопереноса, формирующих температурное поле такой многокомпонентной системы как грунт, представляет собой чрезвычайно сложную задачу, поскольку требует учета и математического описания разнообразных механизмов их осуществления: теплопроводности в отдельной частице, теплопередачи от одной частицы к другой при их контакте, молекулярной теплопроводности в среде, заполняющей промежутки между частицами, конвекции пара и влаги, содержащихся в поровом пространстве, и многих других. Строго говоря, при моделировании температурного поля грунта, кроме учета механизмов осуществления процессов теплопереноса, необходимо учитывать химико-минералогическую природу скелета, механическую структуру материала твердых частиц, степень дисперсности среды, форму и размер частиц и пор, число фаз, количественные соотношения между фазами и их взаимное расположение в среде, заполняющей поровое пространство, а также многие другие физико-химические параметры грунта. Детальный учет перечисленных факторов при моделировании температурного поля грунта представляет собой весьма серьезную проблему [15].

Однако используя модель эквивалентной теплопроводности, становится возможным с

достаточной точностью описать эти процессы одним дифференциальным уравнением в частных производных параболического типа, но с эквивалентными коэффициентами [16]. При этом грунт рассматривается как квази-однородное тело, к которому применимо обычное уравнение теплопроводности, связывающее между собой температуру T_z , время t и глубину z [4]

$$\frac{\partial T_z}{\partial t} = a_z \frac{\partial^2 T_z}{\partial z^2}. \quad (2)$$

Определение температурного поля грунта на основе решения исходного уравнения (2) возможно при заданных краевых, то есть начальном и граничном условиях.

Начальное условие определяется заданем закона распределения температуры вдоль глубины грунта в начальный момент времени

$$T_z(z, 0) = T_{z0} + k_T z, \quad (3)$$

где: T_{z0} – среднегодовая температура поверхности грунта, °C;

k_T – коэффициент, учитывающий возрастание температуры с увеличением глубины и зависящий от величины потока радиогенного тепла, для условий Украины можно принять $k_T = 0,03$ °C/м.

Граничные условия, выражающие закон взаимодействия между окружающей средой и грунтом, должны быть сформулированы на двух границах последнего.

Граничное условие на поверхности грунта можно записать в следующем виде

$$T_z(0, t) = T_{z0} + A_T \sin\left(\frac{2\pi}{\Theta}t\right). \quad (4)$$

Температурные колебания с увеличением глубины быстро затухают и, начиная с некоторой величины $z \geq Z$, температура грунта практически не меняется на расчетном интервале времени, что позволяет использовать следующее граничное условие [16]

$$T_z(Z, t) = T_{z0} + k_T Z = const. \quad (5)$$

Согласно [17] амплитуды годовых колебаний убывают практически до нуля на глубине около 30 м в полярных широтах, около 15-20 м в средних широтах, около 10 м в тропиках (где и на поверхности грунта годовые амплитуды меньше, чем в средних широтах). На этих глубинах начинается слой постоянной годовой температуры.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ЗЕМЛИ

Поэтому в граничном условии (5) можно принять $Z = 100$ м, что гарантированно обеспечит отсутствие колебания температур на этой глубине и приемлемые вычислительные затраты [18].

Используя [19], после аппроксимации данных многолетних наблюдений (рис. 3), определили температуру поверхности грунта для Запорожского региона как функцию времени

$$T_z(0, t) = 12,0 + 15,2 \sin\left(\frac{2\pi}{12}t + 4,15\right). \quad (6)$$

Выражение (6) содержит начальную фазу колебаний температуры равную 4,15 мес. Поэтому при моделировании природного поля температур грунта с использованием граничного условия (4), в котором начальная фаза отсутствует, время от начала процесса для Запорожского региона будет не 15 января (поскольку у нас есть данные только о среднемесячных температурах поверхности грунта), а примерно 20 апреля (см. рис. 3). То есть 20 апреля для природно-климатических условий Запорожского региона температура поверхности грунта имеет свое среднегодовое значение.

Чем больше плотность и влажность грунта, тем выше коэффициент температуропроводности, тем быстрее распространяются в

глубину и тем глубже проникают колебания температуры. Согласно [20] коэффициент температуропроводности грунтов $a_z = 0,76-2,67$ м²/мес. и при одинаковой плотности и влажности он зависит также от типа грунта. Так песок имеет наибольший коэффициент температуропроводности, супесь несколько меньший, а суглинки имеют наименьший коэффициент температуропроводности.

Решив численным методом уравнение (2) с крайними условиями (3), (4) и (5), а также учтя начальную фазу t_0 , получили зависимость температуры грунта от времени и глубины, визуализация которой представлена на рис. 4 и 5.

Как видно из рис. 5, для природно-климатических условий Запорожского региона годовые колебания температуры грунта достигают глубины $z = 9-17$ м.

Таким образом, алгоритм, позволяющий моделировать природное температурное поле поверхностных слоев Земли, заключается в следующем:

1) на основе источников [11, 12] определить k_T – коэффициент, учитывающий возрастание температуры с увеличением глубины;

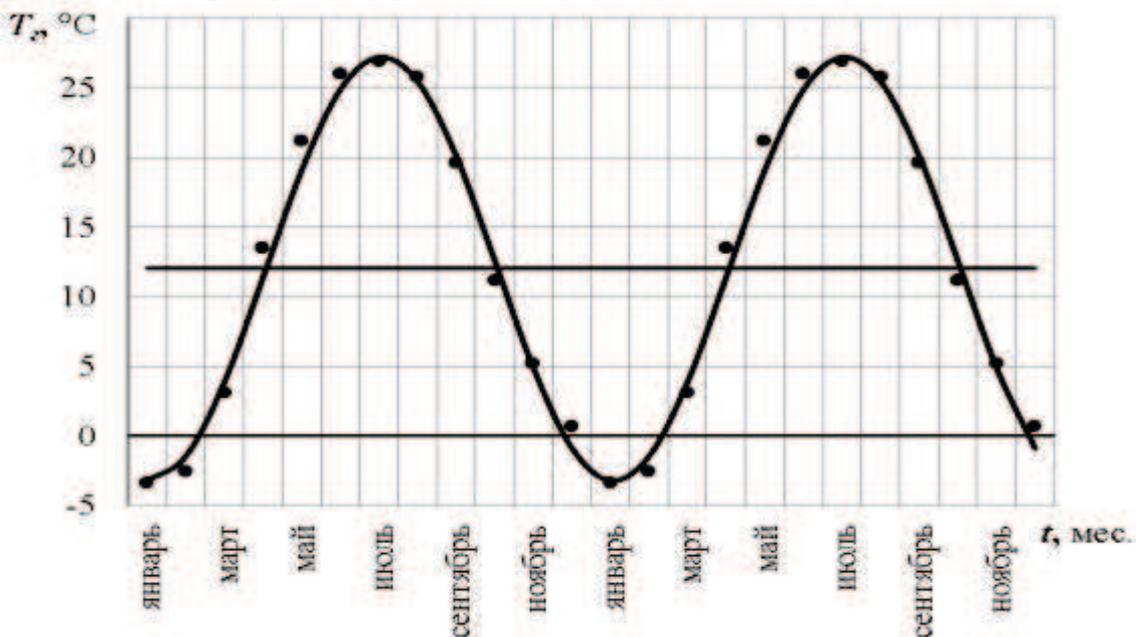


Рис. 3. Температура поверхности грунта по многолетним наблюдениям для Запорожского региона

Fig. 3. The surface temperature of the soil for long-term observations Zapor-rozhskogo region

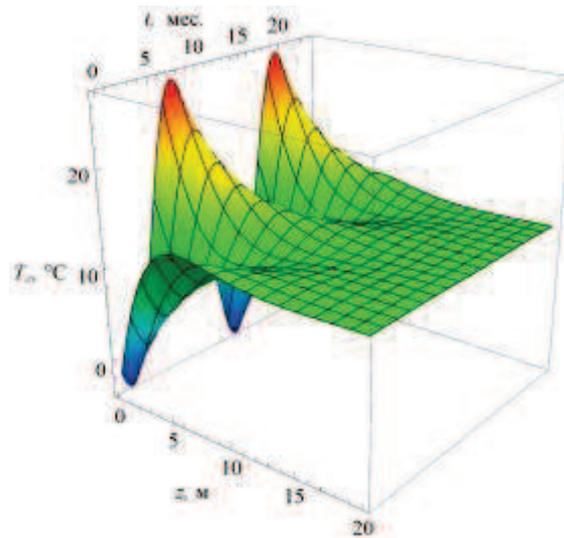
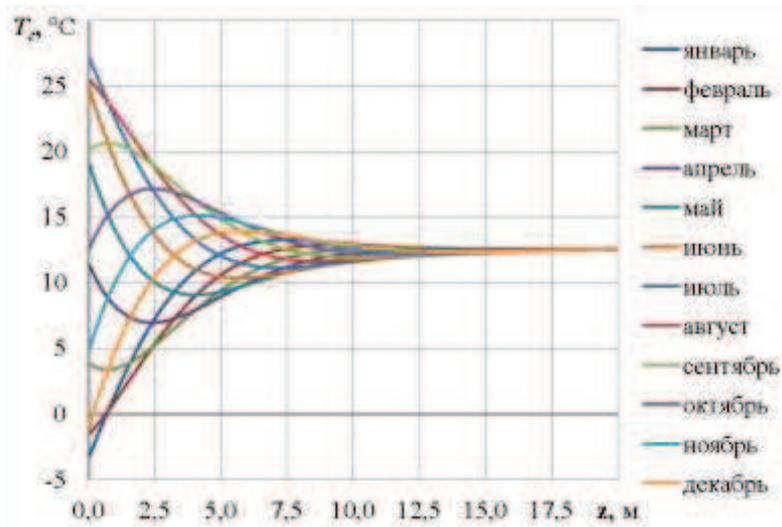
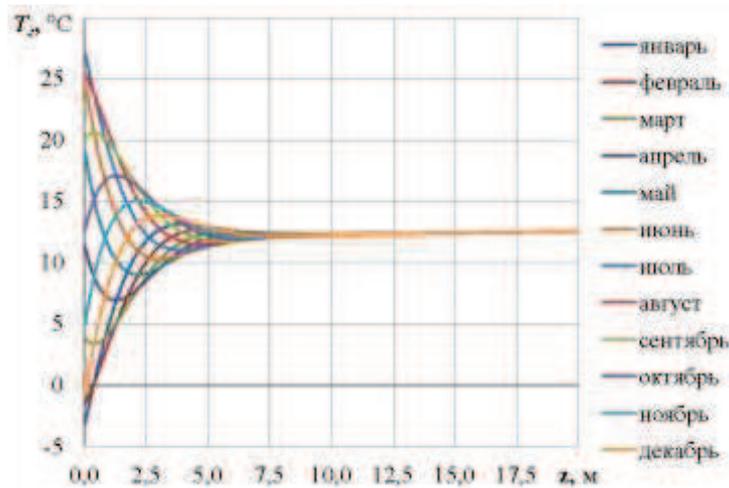


Рис. 4. Зависимость температуры грунта T_g от времени t и глубины z
Fig. 4. The dependence of the ground temperature T_g of the time t and depth z



а



б

Рис. 5. Температура грунта T_g для различных месяцев года в зависимости от глубины z при коэффициенте температуропроводности $a_z = 2,67 \text{ м}^2/\text{мес.}$ (а) и $a_z = 0,76 \text{ м}^2/\text{мес.}$ (б).

Fig. 5. Soil temperature T_g for the different months of the year, depending on the depth z with a coefficient of thermal

2) данные многолетних наблюдений из [19] или любого другого официального источника относительно температуры поверхности грунта аппроксимировать функцией вида $T_z(0, t) = T_{z0} + A_T \sin\left(\frac{2\pi}{\Theta}t + t_0\right)$;

3) по [20] для типа, плотности и влажности грунта определить коэффициент температуропроводности a_z ;

4) решить численным методом уравнение (2) с краевыми условиями (3), (4) и (5) и учесть начальную фазу t_0 .

ВЫВОД

Разработан алгоритм, позволяющий моделировать природное температурное поле поверхностных слоев Земли для различных природно-климатических условий и грунтов различной температуропроводности. Установлено, что для природно-климатических условий Запорожского региона годовые колебания температуры грунта достигают глубины $z = 9-17$ м. Полученные результаты будут использованы для моделирования технологических процессов технических средств, способных использовать геотермальную энергию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rozrobity 2011: Rozrobity projekt svinarskogo pidpriemstva na 12000 goliv vidgodivli v rik z vikoristannyam alternativnikh dzherel yenerгии ta yenergooshchadnogo tekhnologichnogo obladdannya : zvit pro NDR (zaklyuchnyy): № DR 0111U004422 / ker. O. S. Kovyazin, vik. O. V. Parieva, O. D. Potapenko // Institut mekhanizatsii tvarinnitstva NAAN. – Zaporizhzhya. – 105. – Inv. № 0212U006519.
2. Boltyanskaya N. 2012: Puti razvitiya otrasli svinovodstva i povysheniye konkurentosposobnosti yeye produktsii / Natalya Boltyanskaya // An international journal: Motrol. Comission and energetic in agriculture: Lublin-Kiev-Simferopol-Mykolayiv-Lviv-Rzeszów. – Vol. 14. – № 3. – 164-175.
3. Bugaevskiy V. M. 2010: Vpliv seredovishcha ta tekhnologii utrimannya na produktivnist sviney / V. M. Bugaevskiy, O. M. Ostapenko, M. I. Danilchuk // Naukovi pratsi: Naukovo-

- metodichniy zhurnal. Yekologiya. – Mikolaiv : Vid-vo ChDU im. Petra Mogili. – T. 132. – Vip. 119. – 59-61.
4. Polyanin A. D. 2001: Spravochnik po lineynym uravneniyam matematicheskoy fiziki / A. D. Polyanin. – M.: FIZMATLIT. – 576.
5. Lykov A. V. 1967: Teoriya teploprovodnosti / A. V. Lykov. – M. : Vyssh. shk. – 600.
6. Tarasov A. I. 2011: Obosnovaniye grani-chnykh usloviy teploobmena pri modelirovanii gruntovykh teploobmennikov / A. I. Tarasov, V. A. Tarasova // Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – 6/8(54). – 9-14.
7. Koshlyakov N. S. 1970: Uravneniya v chastnykh proizvodnykh matematicheskoy fiziki / N. S. Koshlyakov, E. B. Gliner, M. M. Smirnov. – M.: Vyssh. shk. – 712.
8. Denisova A. E. 2003: Integrovani sistemi alternativnogo teplopostachannya dlya yenergozberigayuchikh tekhnologiy (teoretichni osnovi, analiz, optimizatsiya): dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.14.06 / Alla Evsiivna Denisova. – Odesa. – 313.
9. Didukh V. 2002: Investigation of vibrating temperature process efficiency when drying agricultural materials / Volodymyr Didukh, Ruslan Kirchuk // An international journal: Motrol. Commission of motorization and energetics in agricultural: Lublin. – Vol. 2. – 46-51.
10. Ground-source 2005: Ground-source Heat Pump Project Analysis: Chapter // RETScreen® Engineering & Cases Textbook. – Ministry of Natural Sources of Canada. – 70.
11. Pollack H. N. 1993: Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set / Henry N. Pollack, Suzanne J. Hurter, Jeffrey R. Johnson // Reviews of Geophysics. – № 31(3). – 267-280.
12. Global: Global Heat Flow Data: [Elektron. resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.geophysik.rwthachen.de/IHFC/heatflow.html>.
13. Kavanaugh P. K. 1997: Ground-source Heat Pumps – Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings / P. K. Kavanaugh, K. Rafferty // Publishing of American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, USA. – 223.
14. Nerpin S. V. 1967: Fizika pochvy / S. V. Nerpin, A. V. Chudnovskiy. – M.: Nauka. – 584.

15. Vasilyev G. P. 2006: Teplokhadosnab-zheniye zdaniy i sooruzheniy s ispolzovaniyem nizkopotentsialnoy teplovoy energii poverkhnostnykh slojev zemli: dis. dokt. tekhn. nauk: 05.23.03 / G. P. Vasilyev. – M. – 432.
16. Chudnovskiy A. F. 1976: Teplofizika pochv / A. F. Chudnovskiy. – M.: Nauka. – 352.
17. Khromov S. P. 2006: Meteorologiya i klimatologiya / S. P. Khromov, M. A. Petro-syants. – M.: Izd-vo Mosk. un-ta: Nauka. – 582.
18. Samarskiy A. A. 2003: Vychislitel'naya teploperedacha / A. A. Samarskiy, P. N. Vabish-chevich. – M.: Yeditorial URSS. – 784.
19. Nauchno-prikladnoy 1990: Nauchno-prik-ladnoy spravochnik po klimatu SSSR. – Ser. 3. Mnogoletniye dannyye. – Ch. 1-6. – Vyp. 10. Ukrainskaya SSR. – Kn. 1. – L.: Gidrometeoiz-dat. – 608.
20. Osnovaniya 2005: Osnovaniya i fundamenty na vechnomerzlykh gruntakh: SNiP 2.02.04-88. – M.: Gosstroy Rossii. – 52.

MODELING OF NATURAL TEMPERATURE FIELDS OF SURFACE LAYERS OF EARTH

Summary. An algorithm has been developed, allowing to modeling the natural temperature field of surface layers of the Earth for different natural-climatic conditions and grounds of different thermal diffusivity. On the example of conditions in Zaporozhye region annual fluctuations of ground temperature in the depth is determined.

Key words: surface layer of the Earth, temperature field, thermal diffusivity of ground, depth.