

**Пінчук О. Л., к.т.н., доцент, Романюк І. В., к.т.н., доцент,  
Герасімов Є. Г., к.т.н., доцент** (Національний університет водного  
господарства та природокористування, м. Рівне)

## **КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ В ҐРУНТІ ТА ПРИЗЕМНОМУ ШАРІ ПОВІТРЯ ЗА УМОВ ПОВЕРХНЕВОГО ОБІГРІВУ ШИРОКОЮ ОБОЛОНКОЮ-РУКАВОМ**

**Представлено результати комп'ютерного моделювання розподілу температури в ґрунті та приземному шарі повітря за умов поверхневого обігріву широкою оболонкою-рукавом. Отримані результати базуються на використанні математичної моделі, що складається з рівняння теплового балансу з врахуванням теплопровідності та конвективної складової, рівняння Нав'є-Стокса та рівняння нерозривності потоку.**

**Ключові слова:** моделювання, захищений ґрунт, оболонка-рукав, температура, вітер.

**Вступ.** Серед перспективних шляхів використання скидних теп-  
лих вод науковці виділяють теплову меліорацію ґрунту за допомогою  
гнучких водонаповнених оболонок-рукавів. На базі цієї технології  
запропоновано створювати спеціальні гідротехнічні системи поверх-  
невого обігріву ґрунту (ГС ПОГ) та спеціальні агрогосподарства для  
виращування сільськогосподарської продукції [1].

Питаннями розробки і дослідження енергоефективних констру-  
кцій ГС ПОГ з використання скидного тепла промислових та енерге-  
тичних об'єктів активно займалися і займаються науковці провідних  
країн світу: США (D. Cook, L. Voersma), Франції (A. Seas, A. Grauby), Ні-  
меччини (L. Reinken, J. Norbert), Росії (В.Г. Фарберов, М.В. Турбін),  
Білорусії (Г.І. Афанасік, М.М. Лінкевич) та ін.

Експериментальні дослідження хоча і дозволяють отримати до-  
стовірні результати в окремих конкретних умовах, але не дають мо-  
жливості застосовувати їх для інших ґрунтово-кліматичних і гідрогео-  
ологічних умов і тим самим прогнозувати термічну ефективність сис-  
тем обігріву. Тому поряд з експериментальними методами вивчення,  
отримали розвиток і теоретичні дослідження, які присвячені питан-  
ням теплопередачі між ґрунтом і розташованими в ньому джерелами  
тепла, а також теплообміну між ґрунтом і приземним шаром повітря.

Питанням моделювання теплообміну в ґрунті за наявності тру-  
бопровідних систем обігріву присвячені роботи О.Е. Власова,



Е.П. Шубіна, Л.М. Альтшулера, С.С. Бенусовича, О.І. Іоффе та ін. Розвивається також моделювання, що засноване на аналітичних розв'язках рівняння теплопровідності Фур'є [2; 3]. В роботі [4] наведено порівняння адекватності різних методів аналітичного моделювання, а саме методу заміни змінних по Чудновському та методу, що використовує WKБ-апроксимацію (Wentzel-Kramers-Brillouin).

З розвитком обчислювальної техніки велику популярність здобули числові методи моделювання, зокрема метод скінченних різниць, схема нейронних мереж та інші, що відображено в роботах [5; 6; 7; 8; 9].

В роботах А.Я. Бомби, В.П. Вострікова і І. В. Романюка [10; 11; 12; 13] уточнені крайові умови задачі стаціонарної теплопровідності для випадку відкритого ґрунту з широкими рукавами-оболонками та випадку додаткового захисту ґрунту, що обігрівається, напівсферичними плівковими укріттями при застосуванні моделі еквівалентної теплопровідності Д.О. Куртенера та О.Ф. Чудновського.

**Матеріали та методи.** На даному етапі, подальшого дослідження потребують конструкції ГС ПОГ з метою виявлення найбільш енергоефективних, визначення впливу на їх функціонування кліматичних факторів та вироблення єдиного підходу щодо оцінки їх соціальної, економіко-екологічної та інвестиційної значимості.

Ефективним інструментом при вирішенні таких наукових задач є математичне і комп'ютерне моделювання - проведення чисельних розрахунків з використанням сучасних програмних комплексів.

В [1] запропонована математична модель, що описує процеси теплопередачі та теплообміну в ГС ПОГ і представляє собою систему рівнянь, що складається з рівняння теплового балансу з врахуванням теплопровідності та конвективної складової, рівняння Нав'є-Стокса та рівняння нерозривності потоку:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q + \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \rho C_p \left( u_x \frac{\partial T}{\partial x} - u_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \\ F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu_v - \frac{2}{3} \mu \right) \operatorname{div} u \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right] = 0 \\ F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \mu_v - \frac{2}{3} \mu \right) \operatorname{div} u \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right] = 0 \cdot \quad (1) \\ \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} = 0 \\ \rho = \frac{pM}{RT} \\ \mathbf{F} = (\rho - \rho_{\text{звн}}) \mathbf{g} \end{array} \right.$$

Для розв'язку розглянутої математичної моделі процесів теплопередачі було використано програму COMSOL Multiphysics – це потужне інтерактивне середовище для моделювання та розрахунків інженерних задач, що базується на розв'язуванні диференціальних рівнянь з частинними похідними методом скінченних елементів.

Перевірку адекватності математичної моделі теплопередачі та теплообміну в стаціонарному режимі проводили на моделі еквівалентній натурній дослідній установці.

**Результати.** Нижче наведено результати моделювання (поперечні та поздовжні перерізи) впливу вітру різної швидкості на розподіл температури в ґрунті та приземному шарі повітря за умов поверхневого обігріву широкою оболонкою-рукавом в умовах захисту тунельним укриттям та без нього.

При проведенні чисельних розрахунків виходили з таких припущень:

1. На поверхні ґрунту поза межами укриття та на поверхні плівки тунельного укриття температура рівна температурі навколишнього середовища.
2. На значній відстані від центру укриття (бл. 20 м) тепловий потік через бічну поверхню ґрунту вважаємо рівним нулеві.
3. На певній глибині підтримується постійна температура ґрунту.
4. На поверхні рукава-оболонки температура рівна температурі теплої води.
5. На межі ґрунт-повітря укриття виконується умова рівності теплових потоків.
6. Швидкість повітря на внутрішній поверхні плівки, поверхні оболонки-рукавів та на поверхні ґрунту в укритті рівна нулю.

Чисельними розрахунками встановлені достатньо високі тепломеліоративні ефекти в ґрунті і повітрі за умов поверхневого обігріву водонаповненими рукавами-оболонками. Для випадку, що моделює температуру повітря  $0^{\circ}\text{C}$  і температури теплої води  $20^{\circ}\text{C}$ , створюється в повітрі під укриттям зона гарантованого нагріву, а ґрунт прогрівається до глибини 40 см.

Разом з тим дослідження потребують подальшого продовження з метою встановлення впливу різноманітних кліматично-погодних факторів на функціонування цілісних гідротехнічних систем.

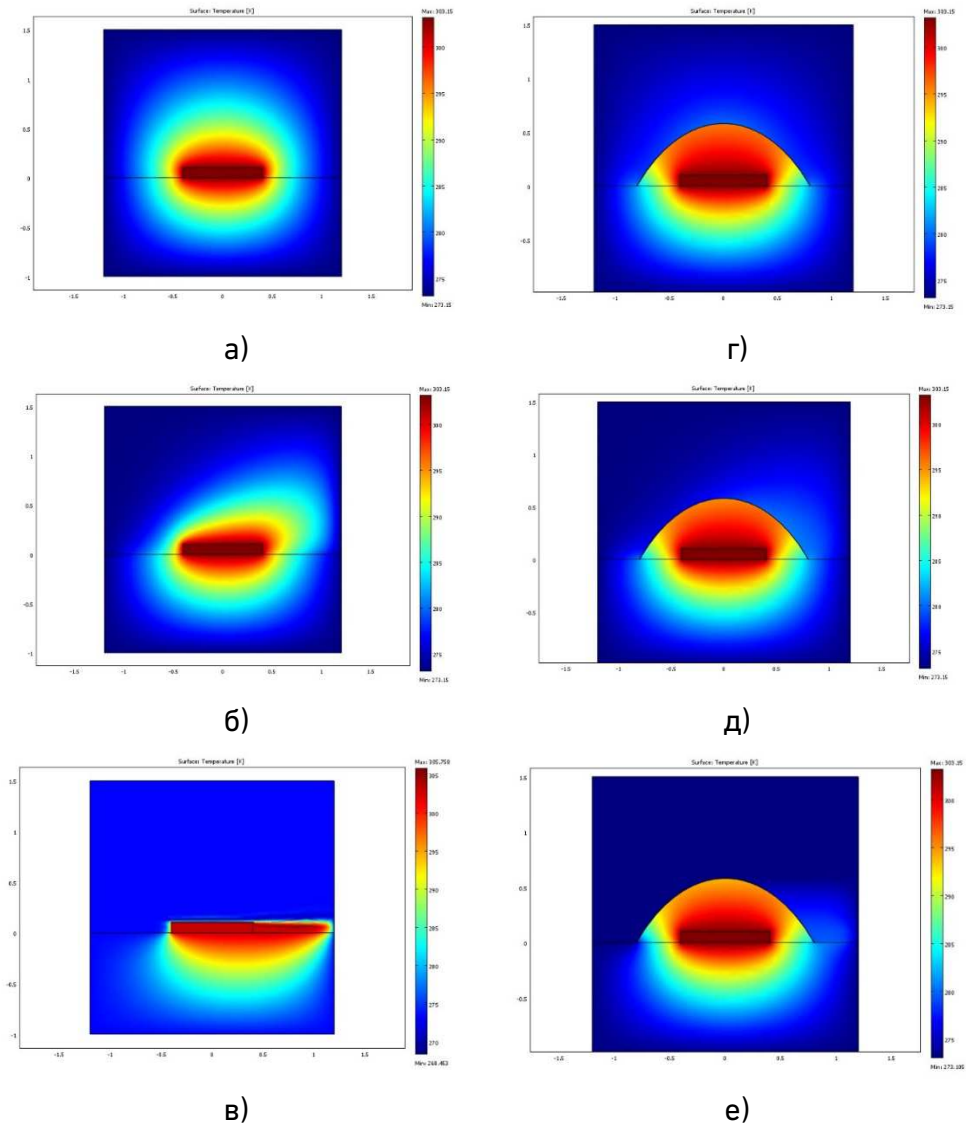
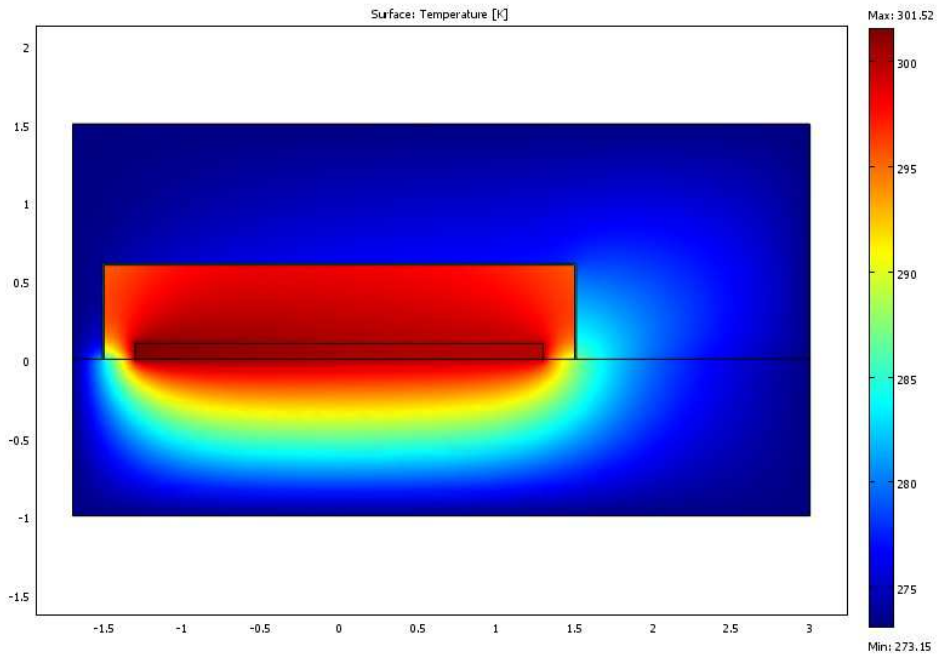
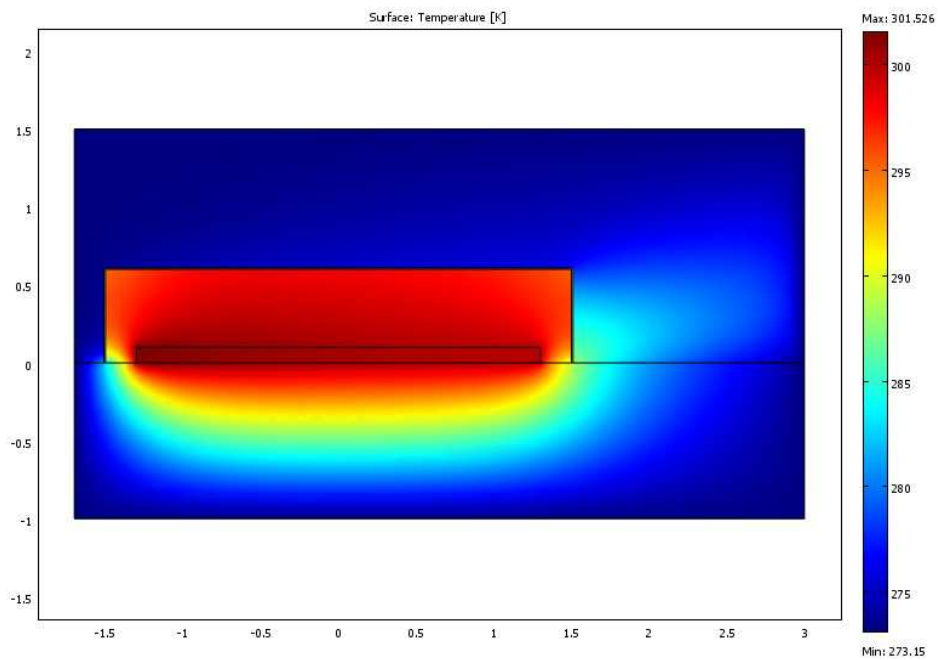


Рис. 1. Результати комп'ютерного моделювання розподілу температури для широкої оболонки-рукава без захисту та при додатковому захисті тунельним укриттям (поперечна проекція):  
а) оболонка-рукав на поверхні незахищеного ґрунту, без вітру; б) оболонка-рукав на поверхні незахищеного ґрунту, несильний боковий вітер; в) оболонка-рукав на поверхні незахищеного ґрунту, сильний боковий вітер; г) оболонка-рукав на поверхні захищеного тунельним укриттям ґрунту, без вітру; д) оболонка-рукав на поверхні захищеного ґрунту, несильний боковий вітер; е) оболонка-рукав на поверхні захищеного ґрунту, сильний боковий вітер



a)



б)

Рис. 2. Результати комп'ютерного моделювання розподілу температури для широкого рукава-оболонки при додатковому захисті тунельним укриттям, несильний вітер (а) та сильний вітер (б)



**Висновки.** На основі отриманих даних можна зробити висновок про більш ефективнішу конструкцію при використанні тунельного укриття, яке дозволяє зменшити вплив сильного вітру (та інших можливих погодних явищ – дощ, сніг, ожеледиця тощо) на розподіл температури всередині гідротехнічної системи.

Теоретичною основою для обґрунтування конструкцій гідротехнічних систем поверхневого обігріву ґрунту рукавами-оболонками є математичні моделі теплопередачі та теплообміну. Математична модель, що описує процеси теплопередачі та теплообміну представляє собою систему рівнянь (1) та складається з рівняння теплового балансу з врахуванням теплопровідності та конвективної складової, рівняння Нав'є-Стокса та рівняння нерозривності потоку. Для практичних цілей інженерних розрахунків можливим є обґрунтування та введення ряду припущень та спрощень. Запропоновано підхід щодо комп'ютерного моделювання, який може бути застосований до різних за конструкцією гідротехнічних систем та дозволяє прогнозувати їх енергоефективність в різних ґрунтово-кліматичних умовах.

1. Пінчук О. Л. Обґрунтування конструкції та параметрів гідротехнічної системи поверхневого обігріву ґрунту оболонками-рукавами при використанні скидних теплих вод : дис. ... канд. техн. наук : 06.01.02. Рівне, 2012. 255 с.
2. Hares M. A., Novak M. D. Simulation of surface energy balance and soil temperature under strip tillage: I. Model description. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 1992. V. 56. P. 22–29.
3. Novak M. D. Analytical solution to predict the long-term surface energy balance components and temperatures of a bare soil. *Water Resour. Res.* 1991. V. 27. P. 2565–2576.
4. The model investigation of soil water content and soil water potential impact on radiation temperature of meadow plant cover / W. Massman, R. T. Walczak, H. A. Sobczuk, P. Baranowski. *Physics of soil water.* Lublin, 1996. P. 93–100.
5. Рычева Т. А. Моделирование температурного режима дерново-подзолистой почвы: определяющая роль условий на поверхности. *Почвоведение.* 1999. № 6. С. 697–703.
6. Dwyer L. M., Hayhoe H. N., Culley J. L. B. Prediction of soil temperature for estimating corn emergence. *Canad. J. Plant Scien.* 1990. V. 6, № 3. P. 619–628.
7. Sikora E., Gupta S. C., Kossowski J. Soil temperature predictions from a numerical heat-flow model using variable and constant thermal diffusivities. *Soil & Tillage Research.* 1990. V. 18, № 1. P. 27–36.
8. Usowicz B., Walczak R. Soil temperature prediction by numerical model. *Polish Journal of Soil Science.* 1995. V. XXVIII/2. P. 87–94.
9. Yang C. C., Prasher S. O., Mehuys G. R. An artificial neural network to estimate soil temperature. *Canad. Jour. Soil Sc.* 1997. V. 77, № 3. P. 421–429.
10. Моделювання теплових процесів в ґрунті при обігріві водонаповненими рукавами / В. П. Востріков, І. В. Романюк, О. Л. Пінчук, Н. В. Вострікова. *Меліорація і водне господарство : міжвідомчий*

тематичний науковий збірник. Київ : Аграрна наука, 2008. Випуск 96. С. 244–253. **11.** Бомба А. Я., Востріков В. П., Савюк Є. В. Моделювання процесу нагрівання родючого шару ґрунту паралельно розміщеними лінійними джерелами тепла. *Комунальное хозяйство городов. Сер. Технические науки : научно-технический сборник.* 2009. Вып. 88. С. 160–166. **12.** Моделювання нелінійних теплових процесів, що виникають в системах горизонтальних труб / А. Я. Бомба, В. А. Гурін, В. П. Востріков, С. С. Каштан. *Вісник НУВГП. Технічні науки : зб. наук. праць.* 2009. Вип. 3(47). С. 269–276. **13.** Романюк І. В. Теплова меліорація ґрунту скидною теплою водою за допомогою гідротехнічної системи з теплообмінниками-рукавами (в умовах Західного Полісся України) : дис. ... канд. техн. наук : 06.01.02. Рівне, 2007. 249 с.

## REFERENCES:

1. Pinchuk O. L. Obgruntuvannia konstruksii ta parametriv hidrotekhnichnoi systemy poverkhnevoho obihrivu ґрунту obolonkamy-rukavamy pry vykorystanni skydnykh teplykh vod : dys. ... kand. tekhn. nauk : 06.01.02. Rivne, 2012. 255 s. **2.** Hares M. A., Novak M. D. Simulation of surface energy balance and soil temperature under strip tillage: I. Model description. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 1992. V. 56. P. 22–29. **3.** Novak M. D. Analytical solution to predict the long-term surface energy balance components and temperatures of a bare soil. *Water Resour. Res.* 1991. V. 27. P. 2565–2576. **4.** The model investigation of soil water content and soil water potential impact on radiation temperature of meadow plant cover / W. Massman, R. T. Walczak, H. A. Sobczuk, P. Baranowski. *Physics of soil water.* Lublin, 1996. P. 93–100. **5.** Rycheva T. A. Modelirovanie temperaturnoho rezhima dernovo-podzolistoi pochvy: opredeliaiushchaia rol uslovii na poverkhnosti. *Pochvovedenie.* 1999. № 6. S. 697–703. **6.** Dwyer L. M., Haynoe H. N., Culley J. L. B. Prediction of soil temperature for estimating corn emergence. *Canad. J. Plant Scien.* 1990. V. 6, № 3. P. 619–628. **7.** Sikora E., Gupta S. C., Kossowski J. Soil temperature predictions from a numerical heat-flow model using variable and constant thermal diffusivities. *Soil & Tillage Research.* 1990. V. 18, № 1. P. 27–36. **8.** Usowicz B., Walczak R. Soil temperature prediction by numerical model. *Polish Journal of Soil Science.* 1995. V. XXVIII/2. P. 87–94. **9.** Yang C. C., Prasher S. O., Mehuys G. R. An artificial neural network to estimate soil temperature. *Canad. Jour. Soil Sc.* 1997. V. 77, № 3. P. 421–429. **10.** Modeliuvannia teplovykh protsesiv v hrunti pry obihrivi vodonapovnenymy rukavamy / V. P. Vostrikov, I. V. Romaniuk, O. L. Pinchuk, N. V. Vostrikova. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo : mizhvidomchyi tematychnyi naukovyi zbirnyk.* Kyiv : Ahrarna nauka, 2008. Vypusk 96. S. 244–253. **11.** Bomba A. Ya., Vostrikov V. P., Saviuk Ye. V. Modeliuvannia protsesu nahrivannia rodiuchoho sharu hruntu paralelno rozmishchenymy liniinymy dzherelamy tepla. *Komunalnoe khazaistvo horodov. Ser. Tekhnicheskie nauki : nauchno-tekhnicheskii sbornik.* 2009. Vyp. 88. S. 160–166. **12.** Modeliuvannia nelineinykh teplovykh protsesiv, shcho vynykaiut v



systemakh horizontalnykh trub / A. Ya. Bomba, V. A. Huryn, V. P. Vostrikov, S. S. Kashtan. *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky* : zb. nauk. prats. 2009. Vyp. 3(47). S. 269–276. **13.** Romaniuk I. V. *Teplova melioratsiia hruntu skydnoiu teploiu vodoiu za dopomohoiu hidrotekhnichnoi systemy z teploobminnykamyrukavamy (v umovakh Zakhidnoho Polissia Ukrainy)* : dys. ... kand. tekhn. nauk : 06.01.02. Rivne, 2007. 249 s.

Рецензент: д.т.н., професор Сафоник А. П. (НУВГП)

---

**Pinchuk O. L., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Romaniuk I. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Gerasimov Ie. G., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

### **COMPUTER MODELING OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE SOIL AND SURFACE AIR LAYER WITH A SURFACE HEATING BY A WIDE SHELL-SLEEVE**

**Among the promising ways of using wastewater, scientists allocate thermal amelioration of soil with the help of flexible water-filled shells-sleeves. At this stage, further studies require the design of the hydrotechnical system of surface soil heating to identify the most energy-efficient ones, to determine the impact on their functioning of climatic factors and to develop a unified approach to assessing their social, economic, environmental and investment significance. An effective tool for solving such scientific problems is mathematical and computer simulation - conducting numerical calculations using modern software systems. The mathematical models of heat transfer are the theoretical basis for substantiating the designs of hydrotechnical systems for surface heating of the soil by sleeves-shells. A mathematical model describing the processes of heat transfer is a system of equations consisting of a heat balance equation taking into account heat conduction and a convective component, a Navier-Stokes equation, and a flow continuity equation. For practical purposes of engineering calculations, it is possible to justify and introduce a number of assumptions and simplifications. Numerical calculations establish sufficiently high heat and melioration effects in soil and air under conditions of surface heating with water-filled sleeves-shells. A computer simulation approach is proposed that can**



**be applied to different hydrotechnical systems and to predict their energy efficiency in different soil and climatic conditions.**

***Keywords:* modeling, protected soil, sleeve-cover, temperature, wind.**

---

**Пинчук О. Л., к.т.н., доцент, Романюк И. В., к.т.н., доцент,  
Герасимов Е. Г., к.т.н., доцент** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

### **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПОЧВЕ И ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ОБОГРЕВЕ ШИРОКОЙ ОБОЛОЧКОЙ-РУКАВОМ**

**Представлены результаты компьютерного моделирования распределения температуры в почве и приземном слое воздуха в условиях поверхностного обогрева широкой оболочкой-рукавом. Полученные результаты базируются на использовании математической модели, состоящей из уравнения теплового баланса с учетом теплопроводности и конвективной составляющей, уравнения Навье-Стокса и уравнение неразрывности потока.**

***Ключевые слова:* моделирование, защищенный грунт, оболочка-рукав, температура, ветер.**

---