УДК 631. 436

Шеин Е.В.[1], Микайылов Ф.Д.[2]
[1]Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова
[2]Сельскохозяйственный факультет университета «Сельчук»
E-mail: evgeny.shein@gmail.com; farizmikayilov@gmail.com

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ИНФИЛЬТРАЦИИ В ПОЧВЕ

Предложено решение уравнения теплопереноса в почве с учетом синусоидальной динамики на верхней границе в условиях инфильтрации, позволяющее по нескольким значением температуры в течение суток определить температуропроводность почвы.

Ключевые слова: почва, теплоперенос, инфильтрация, температуропроводность.

Основными тепловыми и водными свойствами почвы являются коэффициенты теплопроводности, температуропроводности, теплоемкости, теплоусвояемости, водоудерживание и скорость фильтрации. Знание вышеперечисленных характеристик почвы может приблизить разрешение такой современной проблемы, как прогноз теплового и водного режимов почв и грунтов. От температуры существенно зависят скорости химических реакций, протекающих в почве и корнях, передвижение влаги в почве и в растении, газообмен в почве, растворимость минеральных солей и ряд других факторов.

Сущность метода анализа динамики температуры в зоне аэрации основана на том, что изменение температуры на дневной поверхности приводит к перераспределению температур и внутри почвы, причем на это оказывает влияние фильтрационный поток. Анализы наблюдений за температурой в зоне аэрации показывают, что в целом суточные послойные изменения температуры подчиняется синусоидальному закону. Однако, при распространении температурной волны в глубинные слои участвуют и кондуктивная, и конвективная компоненты [1, 4], роль и соотношение которых до сих пор подробно не исследованы.

В связи с этим, цель исследований – установление зависимостей температуры зоны аэрации от режимообразующих факторов и времени наблюдения при изменении температуры на поверхности почвы по синусоидальному закону, и обоснование экспериментальных методов на основе этих решений, позволяющих определить коэффициент температуропроводности почвы при учете влияния инфильтрации.

Для учета влияния фильтрации на изменения теплового поля зоны аэрации почвы, связанные с изменением температуры почвенной поверхности, рассмотрим одномерное нестационарное уравнение теплопереноса

$$(c_m\rho_m)\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_m\frac{\partial T}{\partial x}\right)\pm(c_f\rho_f)\frac{\partial(q_xT)}{\partial x} \qquad (1)$$

Здесь T – температура почвы; λ_m – коэффициент теплопроводности почвы; c_m – удельная теплоемкость почвы; ρ_m – плотность почвы; $c_\upsilon=\rho_m c_m$ – объемная теплоемкость почвы; c_f – теплоемкость единицы массы воды; ρ_f – плотность воды; $q_x=\theta\nu_x$ – скорость фильтрации; ν_x – средняя скорость движения воды в почвах, θ – общая пористость почвы.

В настоящей работе рассматривается процесс изменения температуры в зоне аэрации почвы, который происходит под влиянием градиента температуры поверхности почвы и при инфильтрации. Тогда дифференциальное уравнение (1) представим в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\kappa\frac{\partial^2T}{\partial x^2}-q^*\frac{\partial T}{\partial x} \qquad (2)$$

где $\kappa=\lambda_m/c_\upsilon$ – коэффициент температуропроводности почвы; $q^*=c_f\rho_f q/c_m\rho_m$ – эффективная скорость фильтрации.

При получении уравнения (2) принимаются следующие допущения. Почва рассматривается как (полубесконечная или конечная) однородная изотропная пористая среда с неподвижным скелетом. Начальная влажность предполагается постоянной по глубине и такой низкой, что соответствующая ей гидравлическая проводимость по существу равна нулю. Воздух в почве рассматривается как непрерывная фаза, находящаяся при атмосферном давлении. Чтобы гидравлическую проводимость и капиллярное давление рассматривать как однозначные функции влажности почвы, предполагается, что влагосодержание в любой точке остается постоянным. Вертикальная скорость инфильтрации предполагается постоянной по глубине [2, 5].

Для решения уравнения (2) необходимо поставить следующие начальные и граничные условия:

$$T(x,0)=T_0,$$
$$T(x,\mathrm{t})=T_0+\sum_{j=1}^{m}T_j\cdot\cos(j\omega t+\varepsilon_j)=T_0+\psi(t),$$
$$T(\infty,\mathrm{t})=T_0 \qquad (3)$$

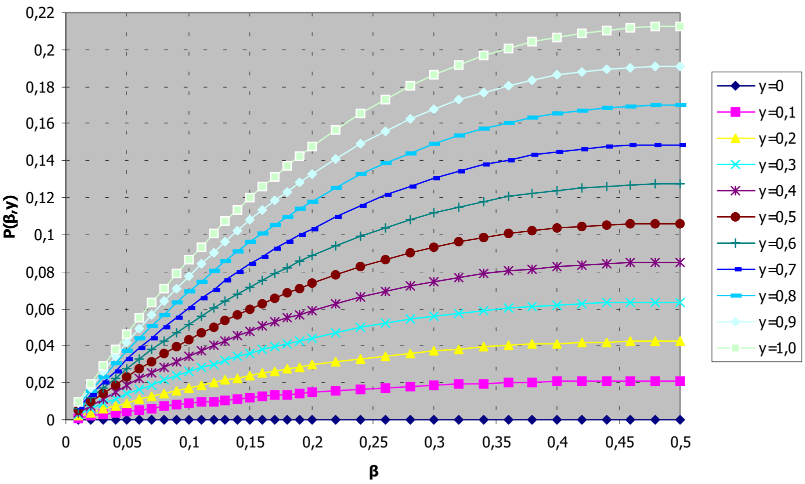

Рисунок 1. Зависимости функции P(y, β) от β и y

Здесь T_0 среднесуточная температура деятельной поверхности почвы; T_j – амплитуды колебаний температуры деятельной поверхности почвы; m – число гармоники; $\omega = 2\pi/\tau_0$ – круговая суточная (или годовая) частота; τ_0 – период (длина) волны, выраженной в сутках или в годах; ε_j – сдвиги фазы.

Решение задачи (2)-(3) в безразмерных переменных имеет вид:

$$T(y,\tau) = T_0 + \sum_{j=1}^{m} \Phi_j(y, \mathrm{b_j}) \cdot \cos\left[j\bar{\omega}\tau + \alpha_j(y, \mathrm{b_j})\right] \quad (4)$$

где $y=x/L$, $\tau = \kappa t/L^2$, $\bar{\omega} = \omega L^2/\kappa$,

$$b_j = L\sqrt{j\omega/2\kappa} = L\sqrt{j\pi/\kappa\tau_0}, \quad \beta_j = q^*/2\sqrt{j\omega\kappa} \quad (5)$$

$$\Phi_j(y, \mathrm{d_{1j}}) = T_j \cdot e^{-d_{1j}\cdot y}, \quad \alpha_j(y, \mathrm{d_{2j}}) = \varepsilon_j - d_{2j}\cdot y,$$

$$d_{ij} = b_j / s_{ij} \ (\mathrm{i}=1,2)$$

$$s_{1j} = \left(\beta_j^2 + \sqrt{1+\beta_j^4}\right)\left(\sqrt{\beta_j^2 + \sqrt{1+\beta_j^4}} + \sqrt{2}\beta_j\right),$$

$$s_{2j} = \left(\beta_j^2 + \sqrt{1+\beta_j^4}\right) \quad (6)$$

Если инфильтрация отсутствует $(q \to 0 \Rightarrow \beta \to 0, \mathrm{d_1} \to b)$, то при $m=1$ решение (4) совпадает с известной зависимостью

$$T(y,\tau) = T_0 + T_a e^{-by} \cdot \cos(\bar{\omega}\tau + \varepsilon - by),$$

$$b = L\sqrt{\omega/2\kappa} \quad (7)$$

которая описывает распространение гармонических колебаний, как в твердом теле, так и в почве при кондуктивном теплопереносе [5, 8].

Указанное решение позволяет разработать методики определения важнейшей теплофизической характеристики, – коэффициента температуропроводности, κ, почвы при определенной влажности. Здесь мы рассмотрим методику определения κ почвы, в результате влияния температуры поверхности и инфильтрационного потока.

Если температура поверхности почвы в течение суток (года) может выражаться одной гармоникой, то κ можно найти из величины уменьшения суточной амплитуды температуры с глубиной или по запаздыванию фазы температурной волны на разных глубинах [5, 8]. Такое определение допускает ощутимые погрешности из-за того, что температура почвы не всегда изменяется по синусоидальному закону [3] вследствие изменчивости метеусловий. Введение же второй гармоники в (3) приближает ход температуры деятельной поверхности почвы к реальной картине.

Используя решение (4) для $m=2$ можно вывести формулу для определения коэффициента температуропроводности κ для произвольного периода τ_0 и безразмерной глубины y. Для этого необходимо знать распределение температуры в почвенном слое [0, L] для *восьми моментов времен* на расчетном интервале времени τ_0. Используя решение (4) для $m=2$ сначала для произвольной глубины y и времени $t_i = i\cdot\tau_0/8$, можно получить:

$$T(y, \mathrm{t_i}) = T_0 + \Phi_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}i + \alpha_1\right) + \Phi_2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}i + \alpha_2\right),$$

$$\left(\mathrm{i} = \overline{1,8}\right) \quad (8)$$

После некоторых несложных преобразований этих уравнений имеем:

$$\sum_{i=1}^{4}\left[T(y, \mathrm{t_i}) - T(y, \mathrm{t_{i+4}})\right]^2 = 8\Phi_1^2(y, \mathrm{b_1}) \quad (9)$$

где $T(y, \mathrm{t_i})$ – значения температуры почв в безразмерной глубине y, а $\bar{T}(\mathrm{t_i})$ осредненные значения температуры почвенного слоя [0, L] в момент времени $t_i = i\cdot\tau_0/4$ (i=1,2,...8). Например, если τ_0 =24 час, то t =3,6,9,... и 24 час.

Используя (5)-(6) в (9), окончательно получим формулу для определения коэффициента κ в следующем виде:

$$\frac{\beta_y}{\left(\beta^2 + \sqrt{1+\beta^4}\right)\left(\sqrt{\beta^2 + \sqrt{1+\beta^4}} + \sqrt{2}\cdot\beta\right)} =$$

$$= P(y,\beta) = \left(\frac{\tau_0 q^*}{4\sqrt{2\pi}L}\right)\ln\frac{8T_a^2}{\sum_{i=1}^{4}\left[T(y, \mathrm{t_i}) - T(y, \mathrm{t_{i+4}})\right]^2} \quad (10)$$

На рис. 1 приведен график зависимости функции P(y,в), вычисленной по левой части формуле (10), от в, равных 0.01,0.02,..., 0,5, для величин y, равных 0.1, 0.2, ... , 1.0.

Для определения κ необходимо заранее знать значение эффективной скорости инфильтрации q^*, распределение температуры $T(y^*, t_i)$, (i=1,2,...,8) почвенного слоя [0,L] на произвольной глубине $y^*=x/L$ для моментов времени: $t_i=i\cdot\tau_0/4$ и T_1 амплитуды колебаний температуры деятельной поверхности почвы. Далее, по правой части формуле (10) следует найти значение $P(y,\beta)$. Наконец, используя график, следует найти величину параметра β.

Используя выражение для β в (5) и учитывая, что для инфильтрационных вод $c_{vf}=1$, рассчитываем коэффициент к по следующей формуле:

$$\kappa = \frac{\tau_0}{8\pi}\left(\frac{q}{\beta C_v}\right)^2 \tag{12}$$

15.07.2011

Список литературы:

1. Барон В.А. О возможности оценки инфильтрационного питания грунтовых вод по наблюдениям за температурой зоны аэрации. В сб.: Теория и практика борьбы с засолением орошаемых земель. М.: Колос. 1971. С. 178-185.
2. Бондаренко Н.Ф. Физические основы мелиораций почв. Л.: Колос. 1975. 258 с.
3. Герайзаде А.П. Термо-и влагоперенос в почвенных системах.-Баку.: Элм, 1982.-159с.
4. Демежко Д.Ю., и др. О совместном влиянии фильтрации подземных вод и палеоклимата на тепловое поле верхней части земной коры // Уральский геофизический вестник. – 2006. –№9. – С. 16 – 26.
5. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука. 1964. 487с.
6. Микайылов Ф.Д, Шеин Е.В. Теоретические основы экспериментальных методов определения температуропроводности почв // Почвоведение. – 2010. – № 5. – С. 597 – 605..
7. Теории и методы физики почв. Под ред.Е.В.Шеина и Л.О.Карпачевского. – М.: Гриф и К. 2007. 616 с.
8. Juri W.A., Gardner W.R., Gardner W.H. Soil Physics. New York. 1991. 328 p.

Сведения об авторах:

Шеин Евгений Викторович, заведующий кафедрой физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова, профессор, д.б.н.

119991 Москва Ленинские горы МГУ, тел. (495) 9393684, e-mail: evgeny.shein@gmail.com

Микайылов Фариз, доцент сельскохозяйственного факультета университета «Сельчук», доктор наук

42075, г. Конья, Турция, e-mail: farizmikayilov@gmail.com

Shein E.V.[1], Mikayilov F.D.[2]

[1]Moscow State University, Soil Science Faculty, e-mail: evgeny.shein@gmail.com

[2]University of Selcuk, Agricultural Faculty, Department of Soil Science, e-mail: farizm@selcuk.edu.tr

THEORETICAL AND METHODICAL FEATURES OF THE HEAT CONDUCTION WITH INFILTRATION PROBLEM SOLUTION

Solution of the heat conduction with infiltration problem is suggested. This solution permits to determine the soil termodiffusivity usind some data of the quotidian variability of soil temperature under infiltration conditions..

Key words: soil, heat conduction, infiltration, termodiffusivity.