

## РАСЧЕТ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ПАРА ПРИ ИСПАРЕНИИ ПРОНИКШЕЙ В ГРУНТ ЖИДКОСТИ

Ю.Н. Попов

(представил д.т.н., проф. И.М. Приходько)

Приведен метод и результаты расчета плотности потока пара при испарении жидкости, проникшей в грунт в результате пролива ее на землю. Получено аналитическое выражение для плотности потока пара, учитывающее физические свойства жидкости и влагосодержание поверхностного слоя грунта.

Во многих случаях, например, при оценке экологической безопасности в случае пролива токсичных жидкостей на грунт, требуется определить массу жидкости, проникшей в грунт. При решении указанной задачи необходимо учитывать то обстоятельство, что проникшая в грунт жидкость будет испаряться до полного высыхания его поверхностного слоя. Целью настоящей работы является разработка метода расчета испарения жидкости, содержащейся в поверхностном слое почвы.

Для решения задачи расчета испарения жидкости из поверхностного слоя грунта воспользуемся результатами исследований процесса испарения почвенной влаги в естественных условиях [1]. На основе полуэмпирической теории турбулентного движения воздуха вблизи поверхности земли в работе получено выражение для расчета плотности потока водяного пара  $j_{вп}$  (кг/(м<sup>2</sup>с)) от поверхности грунта в виде

$$j_{п} = \rho_{а} D_{п} (d_{0} - d_{2}), \quad (1)$$

где  $\rho_{а}$ , кг/м<sup>3</sup> – плотность воздуха;  $D_{п}$ , м/с – коэффициент скорости обмена между поверхностью испарения и воздухом на высоте  $z = 2$ м;  $d_{0}, d_{2}$  (кг пара / кг влажного воздуха) – удельная влажность воздуха соответственно у поверхности земли и в слое воздуха на высоте 2м.

Коэффициент скорости обмена определяется на основе изучения характера движения воздуха в приземном слое атмосферы. Он не зависит от рода жидкости и определяется с достаточно высокой степенью достоверности по формуле

$$D_{п} = 2.7 \cdot 10^{-3} W_{1} (1 + 0,13 \Delta T / W_{1}^2), \quad (2)$$

где  $W_{1}$ , м/с – скорость воздуха на высоте 1м;  $\Delta T = T_{0} - T_{2}$ ;  $T_{0}$  – тем-

пература поверхности грунта;  $T_2$  – температура воздуха на высоте 2м.

Для расчёта испарения с поверхности грунта по формуле (1) производят измерения параметров  $d_0, d_2, T_0, T_2$  на двух уровнях и скорость ветра  $W_1$ .

В приведенных выражениях величина  $d_0$  является величиной неопределённой, не учитываются свойства жидкости и влагосодержание поверхностного слоя грунта.

Физическая модель процесса испарения представляется в виде, показанном на рис. 1.

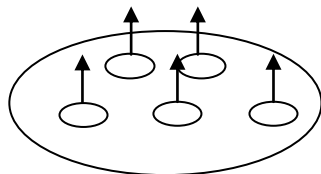


Рис. 1. Схема испарения

Грунт представляет собой пористую структуру. Испарение проникшей в грунт жидкости происходит из пор общей площадью  $F_{ж}$ . Далее пар диффундирует в воздух и переносится потоком воздуха в результате его конвективного перемешивания.

Наличие в атмосферном воздухе третьего (кроме сухого воздуха и водяного пара) компонента будем учитывать величиной удельного паросодержания, по аналогии с удельным влагосодержанием, равным

$$d_{0п} = \frac{m_{п}}{m_{св} + m_{вп} + m_{п}}, \quad (3)$$

где  $m_{св}, m_{вп}, m_{п}$  – соответственно масса сухого воздуха, водяного пара и пара пролитой жидкости. Для каждой из компонент смеси справедливо уравнение состояния идеального газа. После соответствующих преобразований из (3) получим

$$d_{0п} = \frac{\mu_{п}}{\mu_{св}} \frac{p_{п}}{p - \left(1 - \frac{\mu_{вп}}{\mu_{св}}\right) p_{вп} - \left(1 - \frac{\mu_{п}}{\mu_{св}}\right) p_{п}}, \quad (4)$$

где  $\mu_{св}, \mu_{вп}, \mu_{п}$  – соответственно относительная молекулярная масса сухого воздуха, водяного пара и пара пролитой жидкости;  $p$  – атмосферное давление;  $p_{вп}$  – парциальное давление водяного пара в атмосферном воздухе.

Будем полагать, что пар испаряющейся жидкости в пограничном слое равномерно распределяется по поверхности грунта. В этом случае справедливо соотношение

$$\frac{p_{п}}{p_{пп}} = \frac{F_{ж}}{F}. \quad (5)$$

Полагая далее, что грунт не меняет своей структуры при взаимодействии с жидкостью, отношение площади  $F_{\text{ж}}$  к общей площади грунта  $F$  может быть найдено из соотношения

$$\frac{F_{\text{ж}}}{F} = \frac{V_{\text{ж}}}{V} = \frac{\rho_0}{\rho_{\text{ж}}} u, \quad (6)$$

где  $\rho_0, \rho_{\text{ж}}$  – плотность соответственно сухой части грунта и жидкости;  $u = m_{\text{ж}} / m_0$  – влагосодержание грунта;  $m_{\text{ж}}, m_0$  – соответственно масса жидкости, содержащейся в порах, и масса сухой части грунта.

С учётом выражений (5) и (6) формула (4) преобразуется к виду

$$d_{0\text{п}} = \frac{\mu_{\text{п}}}{\mu_{\text{св}}} \frac{u p_{\text{нп}} \frac{\rho_0}{\rho_{\text{ж}}}}{p - \left(1 - \frac{\mu_{\text{вп}}}{\mu_{\text{св}}}\right) p_{\text{вп}} - \left(1 - \frac{\mu_{\text{п}}}{\mu_{\text{св}}}\right) u p_{\text{нп}} \frac{\rho_0}{\rho_{\text{ж}}}}. \quad (7)$$

Искомое выражение для расчёта плотности потока испаряющейся жидкости имеет вид

$$j_{\text{п}} = \rho_{\text{а}} D_{\text{п}} d_{0\text{п}}, \quad (8)$$

где  $d_{0\text{п}}$  определяется по формуле (7), а паросодержание на высоте  $2\text{ м}$   $d_2$  принято равным нулю.

Таким образом, плотность потока пара при испарении влаги грунта является функцией рода жидкости, влагосодержания поверхностного слоя грунта и параметров окружающей среды.

Метод расчёта плотности потока пара с поверхности грунта состоит в следующем:

- путём измерения или расчёта определяется температура поверхности грунта  $T_0$ ;

- измеряются параметры атмосферного воздуха: температура  $T_2$  на высоте  $2\text{ м}$ , скорость ветра  $W_1$  на высоте  $1\text{ м}$ , относительная влажность воздуха  $\phi$  и атмосферное давление  $p$  (скорость ветра  $W_1$  может быть рассчитана по метеорологическим данным исходя из логарифмического закона изменения скорости ветра с высотой [2]);

- по известным значениям температуры воздуха определяются плотность воздуха, давление насыщенного водяного пара, парциальное давление водяного пара  $p_{\text{вп}} = \phi p_{\text{нвп}}$  и давление насыщения известной жидкости  $p_{\text{нп}}$ ;

- для известной жидкости определяется относительная молекулярная масса  $\mu_{п}$ , для сухого воздуха и водяного пара  $\mu_{св} = 29, \mu_{вп} = 18$ ;

- по формулам (2), (7) и (8) рассчитываются соответственно значения  $D_{п}$ ,  $d_{0п}$  и плотность потока пара  $j_{п}$ .

$J_{п} 10^4, \text{ г/(м}^2\text{с)}$

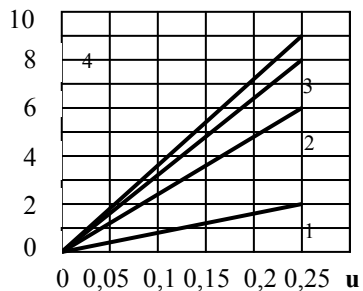


Рис.2. Зависимость плотности потока пара от паросодержания грунта

На рис.2 приведена зависимость плотности потока пара от поверхности грунта от влагосодержания грунта для нескольких жидкостей (1 – вода; 2 – азотная кислота; 3 – этиловый спирт; 4 – керосин Т-1) при следующих условиях: температура грунта (глина) –  $20^{\circ}\text{C}$ ; скорость ветра –  $5\text{ м/с}$ . Из рисунка следует, что при принятых допущениях зависимость плотности потока пара от влаго-содержания имеет линейный характер.

Приведенный метод расчета испарения почвенной влаги может

быть использован при совместном решении уравнений массопереноса в грунте и с его поверхности [3].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Будаговский А.И. Испарение почвенной влаги. – М.: Наука, 1964. – 230 с.
2. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчета рассеяния примесей. – М.: Гидрометеиздат, 1991. – 278 с.
3. Падгурский В.В., Михальская Л.Л., Попов Ю.Н. Математическая модель массопереноса от слоя жидкости, пролитой на поверхность земли. // Системи обробки інформації. – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2001. – Вип. 2(12). – С. 104 - 106.

*Поступила в редколлегию 20.08.2001*