

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/(м²с)) от поверхности грунта в виде

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

где $\rho_{а}$, кг/м³ – 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.

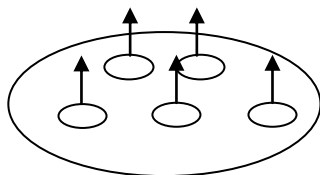


Рис. 1. Схема испарения

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 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 м , скорость ветра W_1 на высоте 1 м , относительная влажность воздуха ϕ 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 $j_{п}$.

$J_{п} 10^4, \text{ г/(м}^2\text{с)}$

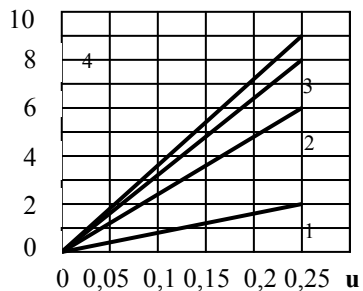


Рис.2. Зависимость плотности потока пара от паросодержания грунта

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°C ; скорость ветра – 5 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