

И. И. КУЗЬМИН

**ТЕПЛОТДАЧА МОРЯ В ВОЗДУХ ПУТЕМ ИСПАРЕНИЯ
И КОНВЕКЦИИ**

(Представлено академиком О. Ю. Шмидтом 15 IX 1938)

Теплоотдача испарением

Теплоотдача испарением определяется из соотношения $W_u = L \cdot F$, где L — скрытая теплота испарения и F — слой испарившейся воды.

В 1936 г. Свердруп (1) первым вывел формулу для расчета испарения с поверхности моря, основанную на теории турбулентного перемешивания:

$$F = \frac{0.216 \cdot (E_w - e_z) \cdot v_z}{0.0164 \cdot \left[\ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \right]^2 + v_z \cdot \Delta z}, \quad (1)$$

где F — испарение в мм/сутки, E_w — максимальная упругость паров при температуре поверхности воды в мм, e_z — абсолютная влажность на высоте z от поверхности моря в мм, v_z — скорость ветра на высоте z в м/сек., z_0 — параметр волнения в см, Δz — толщина пограничного слоя в см.

Определяя параметр волнения по максимальной высоте волны h из соотношения $z_0 = \varepsilon h$, где $\varepsilon = \frac{1}{40}$, для различных скоростей ветра согласно следующей таблицы:

Таблица 1

Скорость ветра, м/сек.	v	1	2	3	4	5	6
Параметр волнения	z_0	0.25	0.75	1.25	2.00	2.50	3.50

и принимая толщину пограничного слоя в соответствии с данными, полученными из наблюдений на Шпицбергене $\Delta z = 0.13 \text{ см} = \text{const}$, Свердруп вычислил по формуле (1) испарение с поверхности океана. Результат вычислений Свердрупа почти совпал с данными по испарению Мейнардуса, определенными другим путем.

Обратив на это внимание, мы использовали богатый и достаточно точный для подобных целей материал наблюдений по озеру Севан, приведенный к многолетнему ряду (2), и вычислили испарение с поверхности озера Севан (табл. 2).

Вычисления были произведены после следующих предварительных преобразований:

1) Формулу (1) пришлось несколько видоизменить и представить в виде:

$$F = \frac{0.216 \cdot (E_w - e_{z_2}) \cdot v_{z_1}}{0.000114 \cdot P \cdot \log\left(\frac{z_1 + z_0}{z_0}\right) \cdot \log\left(\frac{z_2 + z_0}{z_0}\right) + v_{z_1} \cdot \Delta z}, \quad (2)$$

где z_1 — высота горизонта наблюдений над скоростью ветра, z_2 — высота горизонта наблюдений над абс. влажностью, P — давление воздуха в мм.

2) На основании формул (3), (7) и (9) работы Свердрупа (3) толщину пограничного слоя представилось возможным выразить приближенно следующим равенством:

$$\Delta z' = 0.0863 \cdot \log\left(\frac{z_1 + z_0}{z_0}\right) \cdot \log\left(\frac{z_2 + z_0}{z_0}\right) \cdot \frac{(E_w - e_0)}{(e_0 - e_{z_2}) \cdot v_{z_1}} \quad (3)$$

и более точно:

$$\Delta z = 0.0863 \cdot \log\left(\frac{z_1 + z_0}{z_0}\right) \cdot \log\left(\frac{z_2 + z_0}{z_0 + \Delta z^2}\right) \cdot \frac{(E_w - e_0)}{(e_0 - e_{z_2}) \cdot v_{z_1}}, \quad (4)$$

где e_0 — абсолютная влажность на верхней границе пограничного слоя в мм или, принимая во внимание, что толщина этого слоя ничтожна, — абсолютная влажность на высоте 0 от поверхности воды.

В соответствии с данными наблюдений на озера Севан ($z_1 = 900$, $z_2 = 10$, $v_{z_1} = 3.5$, $E_w = 9.54$, $e_0 = 7.53$ и $e_{z_2} = 6.93$) по формуле (3) получено приближенно $\Delta z' = 0.19$ и по формуле (4) — окончательно $\Delta z = 0.18$.

Параметр волнения согласно табл. 2 был принят равным $z_0 = 1.7$.

Величины испарения с поверхности озера Севан, вычисленные по формуле (2), оказались в удовлетворительном согласии с данными наблюдений (табл. 2).

Таблица 2

		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
По наблюдениям на озера Севан (2) . . .	$E_w - e_{10}$	2.8	2.1	1.5	0.1	0	1.5	2.3	3.9	4.9	4.9	3.8	3.3	2.6
	v_{900}	3.4	4.5	4.0	3.2	2.5	2.9	3.7	2.8	3.4	3.3	3.6	4.3	3.5
	F_H	2.6	2.1	1.4	0.1	0	1.3	2.2	3.3	4.5	4.5	3.5	3.3	2.4
Вычислено по формуле (2)	F_b	2.7	2.1	1.5	0.1	0	1.4	2.2	3.7	4.7	4.6	3.7	3.3	2.5

Теплоотдача конвекцией

Далее мы обратили внимание на связь между процессом испарения и процессом передачи тепла от воды в воздух. Между потерей тепла конвекцией W_k и потерей тепла испарением W_u существует определенное отношение (4):

$$\frac{W_k}{W_u} = 0.46 \cdot \frac{(t_w - t_z)}{(E_w - e_z)} \cdot \frac{P}{760}, \quad (5)$$

где t_w — температура поверхности воды, t_z — температура воздуха на высоте z и P — давление воздуха в мм.

Известно, что испарение зависит от скорости ветра, следовательно отношение (5), в котором эта скорость отсутствует, указывает на то, что испарение и теплоотдача конвекцией одинаковым образом зависят от условий турбулентного перемешивания и определяются одной и той же функцией скорости ветра.

Мы поэтому предположили, что аналогично формуле (1), выражающей слой испарившейся воды, теплоотдачу конвекцией можно выразить следующей формулой:

$$W_k = \frac{\lambda \cdot (t_w - t_{z_2}) \cdot v_{z_1}}{\frac{\lambda}{\rho \cdot k_0^2 \cdot \sigma} \cdot \ln \left(\frac{z_1 + z_0}{z_0} \right) \cdot \ln \left(\frac{z_2 + z_0}{z_0} \right) + v_{z_1} \cdot \Delta z}, \quad (6)$$

где λ — молекулярная теплопроводность ($\lambda = 0.56 \times 10^{-4}$), σ — удельная теплоемкость воздуха ($\sigma = 0.238$), ρ — плотность воздуха ($\rho = 0.129 \times 10^{-2}$) и k_0 — безразмерная постоянная ($k_0 = 0.38$).

Вывод этой формулы был основан на предположении, что: 1) около поверхности существует пограничный слой, в пределах которого передача тепла осуществляется благодаря молекулярной теплопроводности:

$$W'_k = - \frac{\lambda \cdot (t_0 - t_w)}{\Delta z}. \quad (7)$$

2) Выше пограничного слоя перенос тепла происходит путем турбулентной проводимости:

$$W_k = - A \cdot \sigma \cdot \frac{dt}{dz}. \quad (8)$$

3) Коэффициент турбулентного перемешивания A зависит от высоты над морем и от параметра волнения z_0 и выражается по Прандтлю:

$$A = \rho \cdot k_0^3 \cdot (z + z_0) \cdot \frac{z z_1}{\ln \left(\frac{z_1 + z_0}{z_0} \right)}. \quad (9)$$

4) Температура воздуха находится в линейной зависимости от логарифма высоты

$$t = t_0 - c \cdot \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right),$$

где t_0 — температура воздуха на высоте 0, или

$$t_{z_2} = (t_0 - t_w) + t_w - c \cdot \ln \left(\frac{z_2 + z_0}{z_0} \right)$$

и

$$\frac{dt}{dz} = - \frac{(t_0 - t_w) + (t_w - t_{z_2})}{(z + z_0) \cdot \ln \left(\frac{z_2 + z_0}{z_0} \right)}. \quad (10)$$

5) Тепло, которое вода отдает воздуху, отводится через пограничный слой, поэтому:

$$W'_k = W_k. \quad (11)$$

Формулу (6) можно представить в форме, практически удобной для вычисления:

$$W_k = \frac{0.0034 \cdot (t_w - t_{z_2}) \cdot v_{z_1}}{0.067 \cdot \log \left(\frac{z_1 + z_0}{z_0} \right) \cdot \log \left(\frac{z_2 + z_0}{z_0} \right) + v_{z_1} \cdot \Delta z}. \quad (12)$$

В том же случае, когда скорость ветра и температура воздуха измерены на одной и той же высоте от поверхности, получается:

$$W_k = \frac{0.0034 \cdot (t_w - t_z) \cdot v_z}{0.067 \cdot \left[\log \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \right]^2 + v_z \cdot \Delta z}, \quad (13)$$

где теплоотдача выражена в $\frac{\text{мал. кал.}}{\text{см}^2 \text{ мин.}}$, скорость ветра в м/сек., температура в $^{\circ}\text{C}$ и высота в см.

Не претендуя на точность большую, чем ± 0.01 кал., мы вычислили по формуле (12) теплоотдачу для о. Севан и получили в среднем за год

теплоотдачу, равную $0.04 \frac{\text{кал.}}{\text{см}^2 \text{ мин.}}$. При этом было принято согласно предыдущим вычислениям $z_0 = 1.7$ и $\Delta z = 0.18$; и согласно данным наблюдений на озере Севан $z_2 = 200$, $z_1 = 900$, $t_w = 9.5$, $t_{z_2} = 6.3$ и $v_{z_1} = 3.5$.

Этот результат вычислений поверяется следующим образом:

Согласно равенству (5), по данным наблюдений станции на озере Севан ($P = 605$ мм, $E_w = 9.54$ мм, $e_z = 5.9$ мм, $t_w = 9.5$ и $t_z = 5.5$), отношение теплоотдачи конвекцией к теплоотдаче испарением получается равным 0.41.

По нашим вычислениям теплоотдачи конвекцией по формуле (12) и теплоотдачи испарением по формуле (2) получается отношение $\frac{W_k}{W_u} = 0.40$, находящееся в согласии с только что найденным отношением по равенству (5).

В 1936 г. Россби⁽⁵⁾ указал на следующие два важных факта:

1) В случае быстро меняющихся условий волнения параметр z_0 может достигать очень высоких величин (до 20 см), но при умеренно устойчивых ветрах поверхность моря как бы приспособляется к тому, чтобы дать возможность воздуху передвигаться над ней наиболее экономным образом, и параметр волнения остается постоянным $z_0 = 0.6$ см.

2) Имеют место случаи, когда вихри достигают поверхности воды и когда турбулентная проводимость имеет определенно выраженную величину на самой поверхности.

Однако эти интересные и важные факты являются еще предметом дальнейших исследований, которые дадут возможность в будущем повысить степень точности определения теплоотдачи, в пределах же принятой здесь нами точности определения на полученных результатах они почти не отражаются.

Государственный
гидрологический институт.

Поступило
29 X 1938.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Н. У. Sverdrup, Das maritime Verdunstungsproblem, Ann. d. Hydr. u. Marit. Meteor., Н. 11, S. 41 (1936). ² В. К. Давыдов, Материалы по исследованию озера Севан и его бассейна, ч. II, в. 2 (1935). ³ Н. У. Sverdrup, On the Evaporation from the Oceans, J. of Marine Research, I, № 1 (1937—1938). ⁴ Bowen, «Physical Review», 2-nd ser., 27, 6 (1926). ⁵ Rossby, «Papers in Physical Oceanography and Meteorology», IV, № 3, Cambridge Massachusetts, June, 1936, p. 3.