

СССР, 1971, т.197, №1. 5. Травницкая И.В., Левитин Р.С. Нелинейная задача теплопроводности при граничных условиях четвертого рода.- ДАН БССР, 1970, т.ХІУ, №9. 6. Левитин Р.С., Травницкая И.В. Решение методом возмущения задач на сопряжение: системы уравнений теплопроводности и смешанной системы. - Тр. 4-го Всесоюз. совещания по тепло- и массообмену "Тепло- и массоперенос". Т.8. Минск, 1972. 7. Шимко К.И., Елисеев А.Е. Исследование движения воды в перфорированных трубах, заключенных в ограниченном объеме жидкости. - В сб.: Вопросы водного хозяйства. Минск, 1974. 8. Шимко К.И., Елисеев А.Е. Уравнение движения жидкости в перфорированных трубопроводах постоянного поперечного сечения с учетом закона раздачи расхода вдоль пути. - В сб.: Водное хозяйство Белоруссии. Вып. 5. Минск, 1975. 9. Luikov A.V.ets. Heat Transfer from a plate in a compressible gas flow. - J. Heat Mass Transfer, 1970, vol. 13.

УДК 551.578.463

П.И. Закржевский

## ИСПАРЕНИЕ С ПОВЕРХНОСТИ СНЕГА

Испарение с поверхности снега в холодный период составляет в ряде случаев заметную долю от выпавших в зимний период осадков. Особенно существенны затраты твердых осадков на испарение в малоснежные зимы.

Запасы воды в снеге к началу снеготаяния определяют последующий весенний подъем уровней грунтовых вод и влагозапасы зоны аэрации, а значит, и режим работы мелиоративных систем, восполнение грунтовых вод на территориях осушительно-увлажнительных систем с грунтовым водохранилищем, с вертикальным дренажем, и являются фактором, необходимым при разработке методики прогноза водного режима осушаемых и прилегающих территорий.

Определение запасов воды в снеге к началу снеготаяния на осушаемых территориях, как правило, службой эксплуатации мелиоративных систем не производится. Не ведут таких наблюдений на территориях с гидромелиоративными системами и учреждения Гидрометеослужбы. Поэтому возникает необходимость расчета запасов воды в снеге к началу снеготаяния по изме-

ренным осадкам с введением корректива на испарение с поверхности снега.

Зависимости для расчета испарения с поверхности снега разрабатывались П.П. Кузьминым [1], А.Р. Константиновым [2], В.И. Кузнецовым [3] и др. В условиях осушаемых болот изучался этот вопрос В.С. Воронич [4], которая показала, что применить разработки указанных авторов не удастся вследствие невысокой точности измерения температуры поверхности снега. В силу указанных причин для расчета испарения с поверхности снега А.Н. Постников [5] предложил следующую упрощенную зависимость

$$E = 0,44 \sum_{ср}^n d_{ср}, \quad (1)$$

где  $d_{ср}$  - среднедекадный дефицит влажности воздуха;  $n$  - число декад за период с устойчивым снежным покровом.

В работе [6] также рекомендуется формула такого вида

$$E = (0,24 + 0,05 U) d. \quad (2)$$

Обычно при исследовании данной задачи не учитывается в полном объеме энергетика и в частности тепло, поступающее из недр земли и выделяющееся при фазовых переходах влаги в зоне промерзания. Попытка такого учета была предпринята в работе [7].

Уравнение баланса тепла для любой поверхности земли в том числе и для покрытой снегом имеет вид

$$V + B + LE = R, \quad (3)$$

где  $V$  - турбулентный обмен в приземном слое воздуха;  $B$  - теплоток, в почву (снег);  $E$  - испарение с дневной поверхности (снега);  $L$  - теплота фазового перехода воды (снега) в пар.

Выразим турбулентный теплообмен в приземном слое зависимостью [8]

$$V = \alpha (t_{п} - t_{в}), \quad (4)$$

где  $\alpha$  - коэффициент конвективного теплообмена;  $t_{п}$  - температура поверхности испарения (снега);  $t_{в}$  - температура воздуха на высоте 2 м.

Теплоток, проходящий через снежный покров, определяется так:

$$B = \lambda_{сн} \frac{t_{п} - t_{з}}{h_{сн}}, \quad (5)$$

где  $\lambda_{\text{сн}}$  - коэффициент теплопроводности снега;  $t$  - температура поверхности земли под снегом;  $h_{\text{сн}}$  - глубина снега.

Поток тепла в слое снега за время  $d\tau$  состоит из тепла, выделившегося при фазовом переходе почвенной влаги в слое замерзания и на границе промерзания  $q_{\text{ф}}$ , тепла, поступившего из недр земли,  $q_{\text{гр}}$  и тепла, выделившегося при изменении теплосодержания в слое активного изменения температуры,  $q_{\text{ак}}$ .

Учитывая указанное, получаем

$$B = \lambda_{\text{сн}} \frac{t - t_{\text{п}}}{h_{\text{сн}}} d\tau = -q_{\text{ф}} dW_{\text{з}} - q_{\text{гр}} d\tau - q_{\text{ак}} d\tau, \quad (6)$$

где  $dW_{\text{з}}$  - приращение замерзшей массы воды за время  $d\tau$ . Подставив в уравнение (3) зависимости (4) и (6) после преобразований выразим температуру поверхности снега

$$t_{\text{п}} = \frac{R + (q_{\text{ф}} \frac{dW_{\text{з}}}{d\tau} + q_{\text{гр}} + q_{\text{ак}}) - LE}{\alpha} + t_{\text{в}}. \quad (7)$$

Для случая неограниченного водообеспечения поверхности, что соответствует рассматриваемому процессу, испарение определится соотношением

$$E = \frac{p_{\text{п}} - p_{\text{в}}}{\beta} = \frac{m_{\text{п}} + k_{\text{п}} t_{\text{п}} - p_{\text{в}}}{\beta}, \quad (8)$$

где  $m_{\text{п}}$ ,  $k_{\text{п}}$  - параметры, определяемые психометрической зависимостью (рис. 1);  $p_{\text{в}}$  - парциальное давление пара на высоте 2,0 м;  $\beta$  - сопротивление переносу пара в двухметровом слое атмосферы, которое определяется зависимостью Пенмана [8],

$$\beta = \frac{32,6}{0,35 (0,5 + 0,53 U)} \frac{\text{мб} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{ч}}{\text{кг}}. \quad (9)$$

Здесь  $U$  - скорость ветра на высоте 2,0 м.

Подставляя в (8) выражение для температуры поверхности испарения (7), после преобразований получим

$$E = \frac{\alpha (m_{\text{п}} + k_{\text{п}} t_{\text{в}} - p_{\text{в}})}{\alpha\beta + Lk_{\text{п}}} + k_{\text{п}} \frac{(R + q_{\text{ф}} \frac{dW_{\text{з}}}{d\tau} + q_{\text{гр}} + q_{\text{ак}})}{\alpha\beta + Lk_{\text{п}}}. \quad (10)$$

Учитывая соотношение Боуэна

$$\frac{V}{LE} = 0,62 \frac{t_{\text{п}} - t_2}{e_{\text{п}} - e_2} \frac{p}{1033}, \quad (11)$$

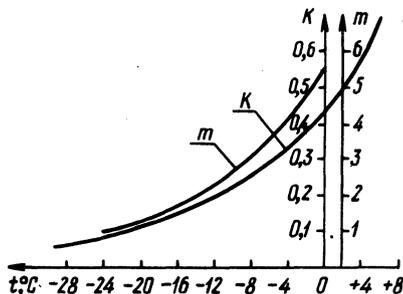
где  $p$  – атмосферное давление, мб, и зависимости (4) и (8), получаем, что произведение коэффициентов сопротивления переноса пара  $\beta$  и конвективного теплообмена  $\alpha$  при условии, что давление равно нормальному, а скрытая теплота возгонки  $L = 680$  ккал/кг, принимает постоянное значение

$$\alpha \beta = 422 \text{ ккал} \cdot \text{мб} / \text{кг} \cdot \text{град}. \quad (12)$$

Учитывая (12) и (9), находим

$$\alpha = (2,26 + 2,40 u) \text{ ккал} / \text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{ч}. \quad (13)$$

Рис. 1. Параметры психометрической зависимости (лед) для минусовых температур.



Так как разность температур воздуха и поверхности снега небольшая, а параметры  $k_{\text{п}}$  и  $m_{\text{п}}$  в таком случае практически не отличаются, выражение в скобке числителя первого члена формулы (10) будет равно дефициту влажности воздуха

$$m_{\text{п}} + k_{\text{п}} t_{\text{в}} - p_{\text{в}} = D_{\text{в}}. \quad (14)$$

Вследствие этого с учетом (12) и (13) зависимость (10) принимает вид

$$E = \frac{(2,26 + 2,40 u) D_{\text{в}}}{422 + 680 k} + \frac{10k(R + \sum q)}{422 + 680 k}. \quad (15)$$

Зависимость (15) в соответствии с принятыми значениями параметров соответствует расчетному промежутку, равному 1 ч. Для расчетов нужны величины испарения за более длительные промежутки времени (сутки, декада, месяц).

Испарение за некоторый период представляет собой сумму срочных значений. Представим эту сумму в виде многочлена

$$\Sigma E = \Sigma \frac{n \alpha_i D_i + k_i Q_i}{\alpha \beta + Lk_i}, \quad (16)$$

где  $Q_i$  - результирующий поток энергии, поступающий к поверхности испарения за единичный промежуток времени. В формуле (16) одночлены числителя и знаменателя имеют либо постоянное значение одного из сомножителей, либо находятся в линейной коррелятивной зависимости. Поэтому формулу (16) можно преобразовать к виду

$$\Sigma E = n \frac{\bar{\alpha} \bar{D} + \bar{k} \bar{Q}}{\alpha \beta + L\bar{k}}, \quad (17)$$

где  $n$  - число элементарных единиц времени в расчетном периоде.

При переходе к расчетной единице, равной одним суткам, суммарное испарение можно выразить формулой

$$E = \frac{(54 + 58 \bar{u})}{422 + 680 \bar{k}} \Sigma D_c + \frac{10 \bar{k} \Sigma (R + Q_{II})}{422 + 680 \bar{k}}. \quad (18)$$

Вторая составляющая формулы (18) может быть равна нулю, больше его или меньше. При равенстве нулю весь поток тепла из почвы балансирует отрицательный радиационный баланс, формирующийся вследствие превышения эффективного излучения над поглощенной снегом суммарной радиацией. При отрицательном значении происходит конденсация, которая уменьшает испарение, а при положительном - возрастание испарения в условиях отсутствия таяния.

Формулу (18) для удобства можно представить в виде

$$E = \gamma \frac{(54 + 58 \bar{u})}{422 + 680 \bar{k}} \Sigma D, \quad (19)$$

где  $\gamma = 1 + \frac{10 \bar{k} (\Sigma R + \Sigma Q_{II})}{(54 + 58 \bar{u}) \Sigma D}$ , изменяется во времени и имеет значения, большие единицы для периода нарастания глубины промерзания. Экспериментальная проверка зависимости (19) выполнена по данным специального изучения испарения с поверхности снега в зимний период 1976 - 1977 гг. на территории Минского экспериментального хозяйства БелНИИМиВХ.

Т а б л и ц а 1. Энергетические показатели испарения с поверхности снега 1976—1977 гг.

Периоды	$q_{\phi}^2$ кал/см <sup>2</sup>	$q_{ак}^2$ кал/см <sup>2</sup>	$q_{тр}^2$ кал/см <sup>2</sup>	$\Sigma q^2$ кал/см <sup>2</sup>	$\Sigma R^2$ кал/см <sup>2</sup>	$u_{ср}$ м/с	$\Sigma D_c$ мд	$E^I$ мм	$E^{II}$ мм	$E$ мм
20.12—22.12	3	4,8	23,4	31,2	-33,0	5,0	1,0	0,46	-0,01	0,45
23.12—29.12	224	18,7	54,6	297,3	-75,0	5,6	2,8	1,66	1,1	2,76
30.12—2.01	47	4,1	31,2	82,3	0	5,3	1,3	0,75	0,4	1,15
3.01—5.01	125	26,1	23,4	174,5	-112	3,2	2,8	1,16	0,2	1,36
6.01—9.01	16	-6,5	31,2	40,7	-30	2,5	2,2	0,60	0,05	0,65
10.01—16.01	172	31,6	54,6	258,2	-223	4,7	3,6	1,8	0,2	2,0
17.01—24.01	464	57,2	62,4	583,6	-284	1,7	3,5	0,96	1,0	1,96
25.01—30.01	0	-49,4	46,8	-2,6	18	2,2	0,8	0,19	0,1	0,29
31.01—6.02	0	17,4	54,6	72,0	82	2,6	3,4	1,0	0,9	1,90
7.02—13.02	45	47,1	54,6	146,7	-74	3,3	4,2	1,54	0,4	1,94
14.02—20.02	0	-59,9	54,6	-5,3	13	2,9	3,9	1,28	0,04	1,32

В процессе экспериментов наблюдались: температура и влажность воздуха на двух высотах 0,2 и 2,0 м, температура поверхности снега, промерзание и температура почвы, влажность почвы, теплофизические константы. Испарение с поверхности снега изучалось с помощью стандартных испарителей с точностью взвешивания до 0,1 г. Кроме того, проводились регулярные снегомерные съемки по постоянному замкнутому маршруту длиной 1 км с числом точек измерения глубины 125 и плотности 25.

В табл. 1 приведены результаты изучения энергетических показателей испарения с поверхности снега на осушенном болоте. Количество тепла, выделившееся при замерзании, определяли с учетом зависимости замерзания почвенного раствора от температуры. Транзитный поток тепла из глубоких слоев рассчитывали по градиенту температуры и коэффициенту теплопроводности талой почвы в слое 0,80...0,60 м. Для всего периода поток из недр земли был постоянным (7,8 кал/см<sup>2</sup> · сут). Приведенные в табл. 1 данные показывают, что теплоток из почвы определяет заметную часть общего испарения.

В табл. 2 сопоставляется измеренное по снегомерным съемкам и рассчитанное по зависимости (18) испарение с поверхности снега. Эти данные показывают, что зависимость правильно отражает взаимосвязи, определяющие ход испарения с поверхности снега. Учитывая, что все параметры формулы были получены не в результате обработки экспериментов, а теоретически, следует признать формулу обоснованной.

Формула в полном виде справедлива для периода, когда в процессе оттепелей не формируется сток и не происходит пополнение грунтовых вод. Для периода от начала замерзаний и до полного оттаивания почвы расчет испарения следует выполнять по формуле (19) с коэффициентом  $\gamma = 1$ .

Т а б л и ц а 2. Баланс твердых осадков и испарение зимой 1976–1977 гг.  
с поверхности снега

Дата снего- мерной съемки	Запас воды в снеге, мм	Осадки, мм	Испарение, мм		Сумма испарения, мм	
			измеренное	рассчитанное	измеренное	рассчитанное
3.01	31				0	0
10.01	32	2,4	1,4	2,0	1,4	2,0
17.01	36	6,4	2,4	2,0	3,8	4,0
25.01	37	1,3	0,3	1,96	4,1	5,96
31.01	42	6,5	1,5	0,29	5,6	6,25
7.02	41	4,2	5,2	1,9	10,8	8,15
14.02	50	10,5	1,5	1,94	12,3	10,09
21.02	61	12,9	1,9	1,32	14,2	11,41

Таким образом, на основе тепло-влажеообмена в системе приземный слой воздуха – снег – почва разработана формула для расчета испарения с поверхности снега. Установлена роль тепла, выделяющегося при замерзании почвы, и определены условия использования среднесуточных характеристик метеозлементов. Экспериментальная проверка показала хорошую сходимость опытных и расчетных величин испарения с поверхности снега.

#### Л и т е р а т у р а

1. Кузьмин П.П. К методике исследования и расчета испарения с поверхности снежного покрова. – Тр. ГГИ, 1953, вып. 41. 2. Константинов А.Р. Обоснование методики расчета испарения по данным метеорологических станций. – Тр. ГГИ, 1956, вып. 54 (108). 3. Кузнецов В.И. Испарение со снежного покрова. – Тр. ГГИ, 1964, вып. 109. 4. Воронич В.С. Испарение с поверхности снега. – В сб.: Мелиорация и использование осушенных земель. Т.18. Минск, 1970. 5. Постников А.Н. К методике расчета испарения в период снеготаяния и половодья в центрально-черноземных областях ЕТС. – Тр. ГГИ, 1974, вып. 214. 6. Рекомендации по расчету испарений с поверхности суши. Л., 1976. 7. Закржевский П.И. Некоторые вопросы расчета испарения в зимний период. – В сб.: Конструкции и расчеты осушительно-увлажнительных систем. Минск, 1975. 8. Афанасик Г.И. Тепло- и влагообмен в системе открытая почва – атмосфера. – В сб.: Мелиорация переувлажненных земель. Т. 21. Минск, 1973.