

**А.В. СОСНОВСКИЙ, Н.И. ОСОКИН**Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия,  
alexandr\_sosnovskiy@mail.ru, osokinn@mail.ru**ВЛИЯНИЕ ДИФФУЗИИ ВОДЯНОГО ПАРА НА ТЕПЛОПЕРЕНОС В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ**

Дана оценка влияния диффузии водяного пара на теплоперенос в снежном покрове на основании математической модели теплопереноса и с учетом диффузии водяного пара и сублимации — конденсации. Установлено, что с учетом диффузии водяного пара глубина проникновения холодного фронта с температурой  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  в снежную толщу увеличивается на 20–30 и на 33–43 % для снега плотностью 250 и 180 кг/м<sup>3</sup> соответственно. Дана характеристика влияния температуры и плотности снега на теплоперенос за счет диффузии водяного пара: при росте температуры от  $-25$  до  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  доля теплопереноса в снежном покрове за счет диффузии увеличивается для снега плотностью 150 кг/м<sup>3</sup> от 9 до 45 % и от 3 до 21 % для снега плотностью 400 кг/м<sup>3</sup>. Выявлено, что плотность снега в значительной степени определяет величину коэффициента эффективной теплопроводности, в то же время глубина проникновения в снег температурного фронта слабо зависит от плотности снега. Это обусловлено небольшим изменением коэффициента температуропроводности снега при вариации его плотности. Представлены обобщенные зависимости коэффициента теплопроводности снега и проведено их сравнение с другими формулами. Зависимость, полученная для наибольших значений коэффициента теплопроводности, соответствует значениям теплопроводности при температуре снега  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , для средних значений — температуре снега  $-10\text{--}12\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Расчеты по зависимости для наименьших значений коэффициента теплопроводности в значительной степени совпадают с расчетами по формуле М. Штурма для зернистого снега.

Ключевые слова: коэффициент теплопроводности, плотность, снежный покров, температура, математическое моделирование.

**A.V. SOSNOVSKIY, N.I. OSOKIN**Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 119017, Moscow, Staromonetnyi per., 29, Russia,  
alexandr\_sosnovskiy@mail.ru, osokinn@mail.ru**INFLUENCE OF WATER VAPOR DIFFUSION ON HEAT TRANSFER IN SNOW COVER**

An assessment is made of the influence of water vapor diffusion on heat transfer in snow cover in terms of the mathematical model of heat transfer and taking into account the diffusion of water vapor and sublimation/condensation. It is established that a consideration of the water vapor diffusion increases the penetration depth of the cold front with a temperature of  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  by 20–30 and 33–43 % in the snow mass with a density of 250 and 180 kg/m<sup>3</sup>, respectively. A characteristic of the influence of temperature and snow density on heat transfer due to the water vapor diffusion is provided. When the temperature increases from  $-25$  to  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the proportion of the heat transfer in snow cover due to the water vapor diffusion increases from 9 to 45 % in the snow with 150 kg/m<sup>3</sup>, and from 3 to 21 % in the snow with density 400 kg/m<sup>3</sup>. It was found that the snow density largely determines the value of the coefficient of effective thermal conductivity, whereas meanwhile the penetration depth of the temperature front into the snow weakly depends on snow density. This is due to a slight change of the thermal diffusivity coefficient of the snow with a change in density. Generalized dependencies of the coefficient of thermal conductivity of the snow are presented, and a comparison of them with other formulas is made. The dependence obtained for the highest values of the thermal conductivity coefficient corresponds to the values of thermal conductivity at the snow temperature of  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; the snow temperature lies between  $-10$  and  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  for mean values. Calculations from the dependence for the smallest values of the thermal conductivity coefficient largely coincide with estimations based on M. Sturm's formula of M. Sturm for granular snow.

Keywords: thermal conductivity coefficient, density, snow cover, temperature, mathematical modeling.

**ВВЕДЕНИЕ**

Снежный покров выступает важным фактором в системе теплообмена «приземный слой воздуха — почвогрунты». Отмечалось [1], что на температуру почв и грунтов в Сибири главным образом влияет высота снежного покрова. Это обусловлено его теплозащитной способностью, которая определяется

термическим сопротивлением, равным отношению высоты к коэффициенту теплопроводности снега [2]. Коэффициент теплопроводности зависит от плотности и структуры снега, его температурного режима [3]. Но при этом большинство формул демонстрируют зависимость коэффициента теплопроводности снега только от его плотности, причем ряд из них дают прямо пропорциональную зависимость [3, 4]. При использовании этих зависимостей не учитываются термические условия, при которых те были получены.

Известно, что с повышением температуры снега растет содержание водяного пара. Его диффузия приводит к росту коэффициента теплопроводности снега [4, 5]. Разнообразные критерии получения зависимостей для определения его теплопроводности, обусловленные как структурой снега, так и термическими условиями, влекут за собой большой разброс значений коэффициента теплопроводности, которые могут различаться в несколько раз.

При измерении теплового потока в снежном потоке сложно расчленить две его составляющие — кондуктивную теплопроводность через ледяные кристаллы и путем диффузии водяного пара (в дальнейшем под диффузией будем понимать диффузию водяного пара). На практике коэффициент эффективной теплопроводности называют коэффициентом теплопроводности, который учитывает теплоперенос в снегу за счет кондукции и диффузии.

Большинство эмпирических уравнений коэффициента теплопроводности снега  $\lambda_s$  связывают это свойство с его плотностью. Сводка основных опубликованных зависимостей теплопроводности снега от его плотности представлена в [6, 7]. В ряде работ, в частности А.В. Павлова [5], С. Фукусако [8], Д. Питмана и Б. Цукермана [9], М. Штурма [6], приводятся также эмпирические зависимости коэффициента теплопроводности снега от его температуры. Влияние структуры снега на теплопроводность ограничивается в основном зависимостями для зернистого снега и глубинной изморози [5].

Обусловленность теплопереноса диффузией в снежном покрове связана с рядом факторов. Надежных непосредственных измерений такого воздействия нет, но есть косвенные оценки. Так, считается, что при низких температурах снега из-за небольшого содержания водяного пара влияние диффузии на теплоперенос невелико [5], поэтому значения теплопроводности приближаются к значениям кондуктивной теплопроводности —  $\lambda_c$ . Рассмотрим наиболее известные зависимости коэффициента теплопроводности снега.

### КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СНЕГА

Известно несколько десятков зависимостей коэффициента теплопроводности ( $\lambda_s$ ) от плотности снега, характерных для снега разной структуры и температуры. Для получения обобщенной зависимости и оценки средних значений коэффициента теплопроводности было обработано 20 известных из литературных источников эмпирических зависимостей [10]. Для каждого значения плотности с шагом  $10 \text{ кг/м}^3$  рассчитывались средние значения  $\lambda_s$ . Результирующую кривую средних значений  $\lambda_{sa}$  аппроксимировали следующей обобщенной зависимостью:

$$\lambda_{sa} = 9,165 \cdot 10^{-2} - 3,814 \cdot 10^{-4} \rho_s + 2,905 \cdot 10^{-6} \rho_s^2. \quad (1)$$

Для описания всего спектра значений коэффициента теплопроводности получены зависимости верхней

$$\lambda_{su} = 1,36 \cdot 10^{-2} + 1,1 \cdot 10^{-3} \rho_s + 10^{-6} \rho_s^2 \quad (2)$$

и нижней огибающих кривых их разброса

$$\lambda_{sl} = 2,96 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-4} \rho_s + 2 \cdot 10^{-6} \rho_s^2, \quad (3)$$

где  $\rho_s$  — плотность снега.

Зависимости (2) и (3) показывают возможный диапазон изменения коэффициента теплопроводности снега на основе проанализированных зависимостей. Установлено значительно меньше зависимостей, учитывающих влияние температуры снега на коэффициент теплопроводности. В зависимости А.В. Павлова [5] такое влияние при  $\rho_s = 120\text{--}350 \text{ кг/м}^3$  предложено определять при помощи температурного коэффициента  $K_p$ :

$$K_p = 1 + 1,18 \exp(0,15t_s), \quad (4)$$

где  $t_s$  — температура снега, °С.

При этом коэффициент теплопроводности снега по [5]  $\lambda_{sp}$  равен

$$\lambda_{sp} = \lambda_{cp} K_p, \quad (5)$$

где  $\lambda_{cp}$  — коэффициент кондуктивной теплопроводности снега [5]

$$\lambda_{cp} = 0,035 + 0,353 \cdot 10^{-3} \rho_s - 0,206 \cdot 10^{-6} \rho_s^2 + 2,62 \cdot 10^{-9} \rho_s^3. \quad (6)$$

Последняя зависимость соответствует, по мнению А.В. Павлова, чисто кондуктивной теплопроводности, так как получена по экспериментальным данным при температуре снега ниже  $-25^\circ\text{C}$ .

Другой температурной зависимостью является формула М. Штурма [6] для расчета коэффициента теплопроводности глубинной изморози  $\lambda_{dh}$

$$\lambda_{dh} = \lambda_{fs} + 51,8 / ((t_s - 27,8)^2 + 211,2), \quad 0 < t_s < -40^\circ\text{C}, \quad (7)$$

где  $\lambda_{fs} = 0,06 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  — теплопроводность снега без учета диффузии водяного пара, которая близка к теплопроводности свежего сухого снега.

Коэффициент теплопроводности снега разной структуры  $\lambda_{sg}$ , полученный при средней температуре снега  $-14,6^\circ\text{C}$  и приведенный в [6], определяется по формулам

$$\lambda_{sg} = 0,023 + 0,234 \rho_s \text{ при } \rho_s < 0,156 \text{ и}$$

$$\lambda_{sg} = 0,138 - 1,01 \rho_s + 3,233 \rho_s^2 \text{ при } 0,156 < \rho_s < 0,6 \text{ (}\rho_s, \text{ г/см}^3\text{)}. \quad (8)$$

В настоящее время формула М. Штурма (8) широко применяется при расчетах термического режима ледников и в моделях снежного покрова [11–13].

Результаты вычисления коэффициента теплопроводности снега по разным зависимостям показали следующее. Значения  $\lambda_{sp}$ , определенные по (5) при температуре снега  $-1^\circ\text{C}$ , приближаются к наибольшим величинам  $\lambda_{su}$ , рассчитанным по верхней огибающей — (2); значения  $\lambda_{sa}$ , определенные по (1), приблизительно совпадают с расчетами  $\lambda_{sp}$  по формуле А.В. Павлова (5) при  $t_s = -10 \div -12^\circ\text{C}$ .

Расчеты по формулам М. Штурма (8) дают небольшие значения коэффициента теплопроводности снега: при изменении плотности снега от 200 до 300  $\text{кг/м}^3$  он колеблется от 0,07 до 0,13  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ , что в 2–3 раза меньше значений, рассчитанных по (1). Коэффициент теплопроводности снега, определенный по (8), в диапазоне плотности от 250 до 400  $\text{кг/м}^3$  всего на 5–10 % больше значений, рассчитанных по (3). Последняя формула дает наиболее низкие значения величины  $\lambda_s$ . Занижение значений коэффициента теплопроводности по формуле (8) отмечается и в работе [14], где было проведено числовое моделирование удельной проводимости снега, с использованием трехмерных изображений микроструктуры снега. В результате была получена зависимость

$$\lambda_{sc} = 2,4 \cdot 10^{-2} - 1,23 \cdot 10^{-4} \rho_s + 2,5 \cdot 10^{-6} \rho_s^2 \quad (9)$$

с указанием возможного разброса значений  $\lambda_s$  для разного типа снега. Результаты расчетов по ней показали, что значения  $\lambda_{sc}$  на 0,03  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  меньше, чем значения  $\lambda_{sa}$ , найденные по формуле (1).

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДИФфуЗИИ ВОДЯНОГО ПАРА НА ТЕПЛОПЕРЕНОС

Один из основных факторов, влияющих на разброс значений коэффициента теплопроводности снега, — его температура. Температура снега и температурный градиент в снежном покрове определяют величину диффузии водяного пара, которая, в свою очередь, воздействует на теплоперенос и температурный режим. Поэтому определение температурного поля требует одновременного решения задачи тепло- и массопереноса. Для оценки влияния диффузии водяного пара на теплоперенос в снежной толще проведем численные эксперименты. За основу примем математическую модель тепло- и массопереноса в снежном покрове с учетом диффузии водяного пара и сублимации — конденсации [15]. Коэффициент теплопроводности снега  $\lambda_s$  в этой модели вычисляется по формуле [16]

$$\lambda_s = \lambda_c + L_e D \frac{\partial e}{\partial t_s} \quad (10)$$

и представляет собой сумму слагаемых, обусловленных кондуктивной  $\lambda_c$  и конвективной (за счет диффузии водяного пара) составляющих, где  $L_e$  — удельная теплота испарения;  $D$  — коэффициент диффузии водяного пара в снежном покрове [5];  $e$  — плотность насыщенного водяного пара.

Одним из параметров зависимости (10) выступает кондуктивная теплопроводность снега  $\lambda_c$ . Ее значения соответствуют низким температурам снега, поэтому зависимость (3) хорошо описывала температурный режим холодной снежной толщи в районе антарктической станции Восток [17]. При этом вклад диффузии водяного пара в величину  $\lambda_{sl}$  составлял 2 %. Для большей части территории России применение зависимости (3) дает завышенный вклад диффузии в теплопроводность снега [3], поэтому в расчетах за величину  $\lambda_c$  были приняты значения  $\lambda_{cp}$  по формуле А.В. Павлова (6). Для рыхлого слабосвязанного снега или глубинной изморози примем значения  $\lambda_c$  по (8). При использовании в расчетах средней огибающей  $\lambda_{sa}$  (выражение (1)) диффузия не учитывалась, так как она уже заложена в самой формуле.

При расчетах начальная температура снега бралась равной 0 °С, плотность снега 180 и 250 кг/м<sup>3</sup>. Эти значения в основном соответствуют плотности снега в январе–марте в Восточной Сибири и на европейской территории России [18]. Суточный ход температуры воздуха  $T_{ат}$  принимался по синусоидальной зависимости  $T_{ат} = 0,5\Delta T_b \sin(\pi\tau/12) + T_a$  со средней суточной температурой  $T_a = -4$  или  $-10$  °С и амплитудой суточных колебаний  $\Delta T_a = 4$  и  $10$  °С соответственно. При более низких температурах воздуха диффузия небольшая. Солнечная радиация не учитывалась. В результате расчетов определялась глубина проникновения холодного фронта (величина  $h_T$ ) с температурой  $T_{sh} = -0,5$  и  $-1$  °С. Результаты расчетов приведены в таблице.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При колебании температуры воздуха от  $-2$  до  $-6$  °С ( $T_a = -4$  °С) и от  $-5$  до  $-15$  °С ( $T_a = -10$  °С) диапазон изменения температуры поверхности снега с учетом длинноволнового излучения составляет  $-4,4 \div -8,2$  и  $-7,3 \div -16,4$  °С соответственно. Влияние плотности снега, коэффициента теплопроводности и диффузии водяного пара на температуру снежной поверхности составляет  $\pm 0,2$  °С.

Результаты расчетов при  $T_a = -4$  °С показали, что для снежного покрова плотностью 250 кг/м<sup>3</sup> при  $\lambda_{cp}$  проникновение фронта с температурой  $T_{sh} = -1$  °С в снежную толщу с учетом диффузии через 1 сут составляет 36 см, что на 20 % больше, чем без ее учета — 30 см. При более низких значениях коэффициента теплопроводности  $\lambda_{sg}$  разница в глубине проникновения холода с учетом диффузии и без нее составляет уже 34 % — 31 см и 23 см соответственно. Это обусловлено бóльшим вкладом в теплообмен диффузии при низких значениях  $\lambda_c$ .

Влияние диффузии на величину  $h_T$  растет для снега меньшей плотности (см. таблицу). При  $\rho_s = 180$  кг/м<sup>3</sup> и  $\lambda_{cp}$  различия в величине  $h_T$  при  $T_{sh} = -1$  °С составляют 30 % ( $h_T = 30$  см без учета диффузии и 39 см с учетом) вместо 20 % (30 и 36 см) при  $\rho_s = 250$  кг/м<sup>3</sup>. При использовании в рас-

**Глубина проникновения ( $h_T$ ) температурного фронта с  $T_{sh} = -1$  и  $-0,5$  °С в толщу снега плотностью 180 и 250 кг/м<sup>3</sup> без учета (с учетом) диффузии водяного пара с коэффициентом теплопроводности снега  $\lambda_{cp}$ ,  $\lambda_{sg}$  и  $\lambda_{sa}$  через  $\tau = 12$  и 24 ч**

Параметр	Температура воздуха ( $T_{ат}$ ), °С			
	$-2 \div -6$		$-5 \div -15$	
	Плотность снега ( $\rho_s$ ), кг/м <sup>3</sup>			
	250	180	250	180
Коэффициент теплопроводности $\lambda_{cp}$ по А.В. Павлову — формула (6)				
$h_T$ при $T_{sh} = -1$ °С, $\tau = 12$ ч	20 (24)	20 (27)	24 (30)	24 (31)
$h_T$ при $T_{sh} = -1$ °С, $\tau = 24$ ч	30 (36)	30 (39)	36 (44)	36 (46)
$h_T$ при $T_{sh} = -0,5$ °С, $\tau = 24$ ч	38 (46)	38 (49)	44 (53)	43 (56)
Коэффициент теплопроводности $\lambda_{sg}$ по М. Штурму — формула (8)				
$h_T$ при $T_{sh} = -1$ °С, $\tau = 12$ ч	15 (20)	15 (22)	19 (25)	18 (27)
$h_T$ при $T_{sh} = -1$ °С, $\tau = 24$ ч	23 (31)	23 (33)	28 (37)	28 (40)
$h_T$ при $T_{sh} = -0,5$ °С, $\tau = 24$ ч	29 (39)	28 (42)	33 (44)	33 (48)
Коэффициент теплопроводности $\lambda_{sa}$ — формула (1)				
$h_T$ при $T_{sh} = -1$ °С, $\tau = 12$ ч	21	20	26	25
$h_T$ при $T_{sh} = -1$ °С, $\tau = 24$ ч	33	32	40	38
$h_T$ при $T_{sh} = -0,5$ °С, $\tau = 24$ ч	41	39	47	45

четах более низких значений коэффициента кондуктивной теплопроводности  $\lambda_{sg}$  различие в  $h_T$  составит 43 % (23 и 33 см) при  $\rho_s = 180$  кг/м<sup>3</sup> и 35 % (23 и 31 см) при  $\rho_s = 250$  кг/м<sup>3</sup>.

Рассмотрим результаты расчетов проникновения волны холода в снежную толщу при применении обобщенной зависимости (1), которая учитывает диффузию водяного пара. При  $T_a = -10$  °С видно, что при  $\rho_s = 250$  (180) кг/м<sup>3</sup> температурный фронт  $T_{sh} = -1$  °С проникает в глубь снежной толщи через 1 сут на глубину 40 (38) см от поверхности, а при  $T_a = -4$  °С — на глубину 33 (32) см от поверхности.

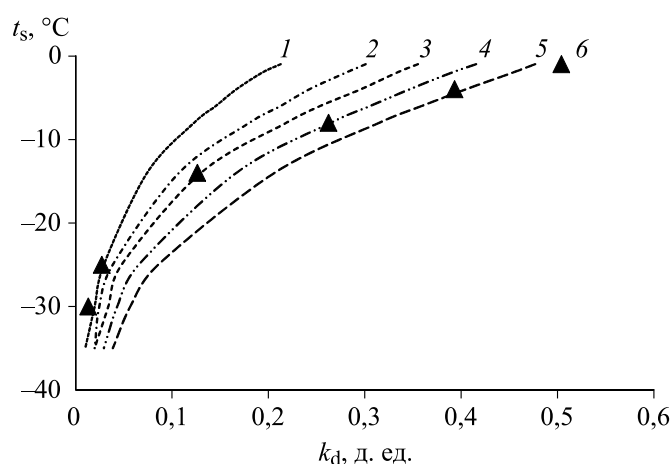
Из таблицы следует, что для снега плотностью 250 и 180 кг/м<sup>3</sup> Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> глубина проникновения в снег температурного фронта с  $T_{sh} = -1$  °С различается всего на 1–2 см. Это обусловлено небольшим изменением коэффициента температуропроводности снега ( $a_s$ ), значения которого прямо пропорциональны плотности и обратно пропорциональны коэффициенту теплопроводности. Так как рост плотности снега частично компенсируется ростом коэффициента теплопроводности, то в результате величина  $a_s$  изменяется незначительно. Температурный фронт с  $T_{sh} = -0,5$  °С проникает в снежную толщу через 1 сут на глубину 39–47 см (см. таблицу). Это согласуется с данными Г.Д. Рихтера [19], который отмечал, что суточные колебания температуры снега  $-0,8$  °С фиксируются в толще снега на глубине 44 см.

Рассмотрим изменение коэффициента теплопроводности снега. Значение  $\lambda_{cP}$  при  $\rho_s = 250$  (180) кг/м<sup>3</sup> составляет 0,15 (0,11) Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> соответственно. Коэффициент теплопроводности с учетом диффузии, рассчитанный по (10), изменяется от 0,24 (0,20) Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> в основании снежной толщи с нулевой температурой снега до 0,19 (0,15) Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> при  $-8$  °С на дневной поверхности снежного покрова, что в 1,6 (1,9) и 1,3 (1,4) раза больше, чем значения кондуктивной теплопроводности в основании и на поверхности снежной толщи соответственно. Таким образом, при снижении плотности и, как следствие, кондуктивной теплопроводности снега растет вклад диффузии в эффективную теплопроводность. Кроме того, данный вклад увеличивается для слабосвязанного снега и глубинной изморози с небольшими значениями кондуктивной теплопроводности, например при  $\lambda_{sg}$ . Так, при  $\rho_s = 250$  (180) кг/м<sup>3</sup> получим  $\lambda_{sg} = 0,09$  (0,06) Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>. При этих значениях плотности снега коэффициент теплопроводности, рассчитанный по формуле (10), изменяется за счет диффузии от 0,18 (0,15) Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> в основании снежной толщи с нулевой температурой снега до 0,13 (0,10) Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> при  $-8$  °С на дневной поверхности снежного покрова, что в 2,1 (2,5) и 1,5 (1,7) раза больше, чем значения  $\lambda_c$ .

При  $\rho_s = 180$  кг/м<sup>3</sup> и расчете  $\lambda_c$  по формулам (6) и (8) коэффициент теплопроводности с учетом диффузии составляет 0,13 и 0,08 Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> при температуре  $-16,4$  °С на дневной поверхности снежного покрова, что в 1,2 и 1,7 раза больше, чем значения кондуктивной теплопроводности. При  $\rho_s = 250$  кг/м<sup>3</sup> коэффициент кондуктивной теплопроводности, найденный по (6) и (8), равен 0,17 (0,11) Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> при  $-16,2$  °С на дневной поверхности снежного покрова, что только в 1,1 (1,2) раза больше, чем значения кондуктивной теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности, рассчитанный по формуле (1), которая учитывает диффузию, составляет 0,18 Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> для снега плотностью 250 кг/м<sup>3</sup>. Это значение находится между 0,19 и 0,17 Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>, полученными при  $\lambda_{cP}$  с учетом диффузии при температуре снега  $-8$  и  $-16,2$  °С соответственно.

Величина  $k_d = (\lambda_s - \lambda_c)/\lambda_s$ , определенная по (10), показывает вклад диффузии в коэффициент теплопроводности снега. С ростом  $k_d$  увеличивается влияние диффузии на коэффициент теплопроводности снега. Результаты расчетов  $k_d$  для снега разной температуры и плотности приведены на рисунке. Видно, что



Доля диффузии водяного пара в коэффициенте теплопроводности снега ( $k_d$ ), рассчитанная по формуле (10), при  $\lambda_c = \lambda_{cP}$  при разной температуре снега ( $t_s$ ) плотностью, кг/м<sup>3</sup>: 1 — 400; 2 — 300; 3 — 250; 4 — 200; 5 — 150; 6 — по формуле Павлова (4).



с увеличением плотности снега и снижением его температуры доля теплопереноса в снежном покрове за счет диффузии снижается. При росте температуры снега от  $-25$  до  $-1$  °С теплоперенос в снежном покрове за счет диффузии ( $k_d$ ) растет от 9 до 45 % для снега плотностью  $150 \text{ кг/м}^3$  и от 3 до 21 % для снега плотностью  $400 \text{ кг/м}^3$ . Таким образом, при более высоких температурах снега увеличивается вклад диффузии в теплопроводность снега. Этот факт отмечается в работе А.В. Павлова [4] как саморегулирование теплозащитной роли снежного покрова. В районах с мягкими зимами отепляющее воздействие снега на почву снижается из-за интенсивной диффузии пара в снегу, и наоборот.

Наибольшие изменения величины  $k_d$  происходят в приповерхностном слое снежного покрова в результате суточных колебаний температуры воздуха. Полученные результаты показывают, что влияние диффузии на коэффициент теплопроводности зависит как от плотности, так и от температуры снега. По формуле А.В. Павлова (6) диффузия обусловлена только температурой снега.

В [20] рассмотрены географические типы формирования и развития снежного покрова. Развитие разных типов снежного покрова в значительной степени связано с интенсивностью диффузии. В районах с резко континентальным климатом с небольшой высотой и плотностью снежного покрова рост диффузии обусловлен высоким температурным градиентом, что приводит к перекристаллизации основной массы снега. При этом самые высокие температуры наблюдаются в основании снежной толщи с наибольшей диффузией и ускоренной перекристаллизацией снега. Последнее будет происходить и в районах с мощным снежным покровом и небольшими температурными градиентами, что может приводить к развитию горизонтов глубинной изморози с низкой механической устойчивостью.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определено, что учет диффузии водяного пара увеличивает глубину проникновения волны холода в снежную толщу на 20–30 % для снега плотностью  $250 \text{ кг/м}^3$  и на 33–43 % для снега плотностью  $180 \text{ кг/м}^3$ . Глубина проникновения в снежный покров волны холода зависит от температуры воздуха, значения коэффициента кондуктивной теплопроводности снега и в меньшей степени от его плотности. Небольшое влияние плотности снега связано с ростом его теплопроводности при увеличении данной характеристики. В результате слабо меняется коэффициент теплопроводности снега, определяющий влияние характеристик среды на теплоперенос.

Результаты математического моделирования показали, что влияние диффузии на теплоперенос в снежном покрове более значимо для снега меньшей плотности при небольшой отрицательной температуре. При росте температуры снега от  $-25$  до  $-1$  °С доля теплопереноса в снежном покрове за счет диффузии водяного пара увеличивается от 9 до 45 % для снега плотностью  $150 \text{ кг/м}^3$  и от 3 до 21 % для снега плотностью  $400 \text{ кг/м}^3$ .

Согласно проведенным расчетам, при моделировании теплообмена в системе «приземный слой атмосферы – снежный покров – подстилающее основание» необходимо использовать зависимости для определения теплопроводности снега, соответствующие температурным условиям процесса, или применять значения кондуктивной теплопроводности снега с добавлением теплопереноса за счет диффузии водяного пара.

*Математическая модель доработана на основе материалов, полученных в ходе экспедиционных исследований на архипелаге Шпицберген (госзадание 0148-2017-0007), численные эксперименты выполнены в рамках проекта «Изменения окружающей среды в регионах Арктики и Восточной Сибири под влиянием глобального потепления» (Программа научно-технического сотрудничества между Российской Федерацией и Японией, 2016–2017 гг.).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шерстюков А.Б.** Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России // Криосфера Земли. — 2008. — Т. 12, № 1. — С. 79–87.
2. **Осокин Н.И., Сосновский А.В., Накалов П.Р., Ненашев С.В.** Термическое сопротивление снежного покрова и его влияние на промерзание грунта // Лед и снег. — 2013. — № 1 (121). — С. 93–103.
3. **Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А.** Влияние стратиграфии снежного покрова на его термическое сопротивление // Лед и снег. — 2013. — № 3 (123). — С. 63–70.
4. **Павлов А.В.** Мониторинг криолитозоны. — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2008. — 230 с.
5. **Павлов А.В.** Теплофизика ландшафтов. — Новосибирск: Наука, 1979. — 286 с.

6. Sturm M., Holmgren J., Konig M., Morris K. The thermal conductivity of seasonal snow // Journ. Glaciol. — 1997. — Vol. 43, N 143. — P. 26–41.
7. Осокин Н.И., Самойлов Р.С., Сосновский А.В., Сократов С.А. О роли некоторых природных факторов в промерзании грунтов // Материалы гляциологических исследований. — 2000. — Вып. 88. — С. 41–45.
8. Fukusako S. Thermophysical properties of ice, snow, and sea ice // Intern. Journ. of Thermophysics. — 1990. — Vol. 11, N 2. — P. 353–372.
9. Pitman D., Zuckerman B. Effective thermal conductivity of snow at  $-88^{\circ}$ ,  $-27^{\circ}$ , and  $-5^{\circ}$  C // Journ. of Applied Physics. — 1967. — Vol. 38, N 6. — P. 2698–2699.
10. Осокин Н.И., Самойлов Р.С., Сосновский А.В., Сократов С.А., Жидков В.А. К оценке влияния изменчивости характеристик снежного покрова на промерзание грунтов // Криосфера Земли. — 1999. — Т. 3, № 1. — С. 3–10.
11. Шмакин А.Б., Турков Д.В., Михайлов А.Ю. Модель снежного покрова с учетом слоистой структуры и ее сезонной эволюции // Криосфера Земли. — 2009. — Т. 13, № 4. — С. 69–79.
12. Wilson N.J., Flowers G.E. Environmental controls on the thermal structure of alpine glaciers // The Cryosphere. — 2013. — Vol. 7. — P. 167–182.
13. Pelt W.J.J. van, Oerlemans J., Reijmer C.H., Pohjola V., Pettersson A.R., Angelen J.H. van. Simulating melt, runoff and refreezing on Nordenskiöldbreen, Svalbard, using a coupled snow and energy balance model // The Cryosphere. — 2012. — Vol. 6. — P. 641–659.
14. Calonne N., Flin F., Morin S., Lesaffre B., Roscoat S.R. du, Geindreau C. Numerical and experimental investigations of the effective thermal conductivity of snow // Geophys. Res. Lett. — 2011. — Vol. 38 [Электронный ресурс]. — [http://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/calonne\\_2011\\_conductivity\\_2011gl049234.pdf](http://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/calonne_2011_conductivity_2011gl049234.pdf) (дата обращения 31.01.2017).
15. Осокин Н.И., Самойлов Р.С., Сосновский А.В. К оценке теплообмена в поверхностном слое снега с учетом проникающей солнечной радиации // Материалы гляциологических исследований. — 2004. — Вып. 96. — С. 127–132.
16. Павлов А.В. Некоторые вопросы теплофизики снежного покрова // Тепловой баланс леса и поля. — М.: Изд-во Ин-та географии АН СССР. — 1962. — С. 186–201.
17. Осокин Н.И., Самойлов Р.С., Сосновский А.В. К оценке коэффициента теплопроводности снега на станции Восток // Материалы гляциологических исследований. — 2004. — Вып. 97. — С. 189–191.
18. Осокин Н.И., Сосновский А.В. Пространственная и временная изменчивость высоты и плотности снежного покрова на территории России // Лед и снег. — 2014. — № 4. — С. 72–80.
19. Рихтер Г.Д. Роль снежного покрова в физико-географическом процессе: Труды Ин-та географии АН СССР. — 1948. — Т. 40. — 86 с.
20. Коломыйц Э.Г. Теория эволюции в структурном снеговедении. — М.: Геос, 2013. — 482 с.

*Поступила в редакцию 17 февраля 2017 г.*