

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГРУНТОВОГО МАССИВА,
УЧИТЫВАЮЩЕЙ ИЗМЕНЕНИЕ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ
ВЛАГИ В ПОРОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ ГРУНТА**

*Васильев Г.П.
Научный руководитель
ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ», д.т.н.*

А Н Н О Т А Ц И Я

В статье представлена методика определения эквивалентной теплопроводности грунтового массива систем сбора низкопотенциального тепла грунта (систем теплосбора), учитывающая фазовые переходы поровой влаги в грунте при многолетней эксплуатации геотермальных теплонасосных систем теплохладоснабжения (ГТСТ) зданий и сооружений. С помощью предложенной автором методики впервые получены новые научные данные об эквивалентной теплопроводности грунтов, учитывающей скрытую теплоту фазовых переходов поровой влаги, как для грунтов по классификации ASHRAE, так и для грунтов, имеющих распространение в России (по классификации СНиП 2.02.04-88).

Одной из наиболее серьезных проблем, возникающих при моделировании теплового поведения систем сбора низкопотенциального тепла грунта при многолетней эксплуатации, является корректный учет в модели процессов, связанных с замораживанием и оттаиванием грунта – поровой влаги в грунтовом массиве.

Как уже отмечалось ранее, в эксплуатационный период массив грунта, находящийся в пределах зоны теплового влияния регистра труб грунтового теплообменника, вследствие сезонного изменения параметров наружного климата, а также под воздействием эксплуатационных нагрузок на систему теплосбора, как правило, подвергается многократному замораживанию и оттаиванию. При этом, естественно, происходит изменение агрегатного состояния влаги, заключенной в порах грунта и находящейся в общем случае как в жидкой, так и в твердой и газообразной фазах одновременно.

Моделирование процессов тепломассопереноса, формирующих тепловой режим такой многокомпонентной системы, представляет собой чрезвычайно сложную задачу, поскольку требует учета и математического

описания разнообразных механизмов их осуществления: теплопроводности в отдельной частице, теплопередачи от одной частицы к другой при их контакте, молекулярной теплопроводности в среде, заполняющей промежутки между частицами, конвекции пара и влаги, содержащихся в поровом пространстве, и многих других. Строго говоря, при моделировании теплового режима систем теплосбора, кроме учета механизмов осуществления в системе процессов тепломассопереноса, необходимо учитывать химико-минералогическую природу скелета, механическую структуру материала твердых частиц, степень дисперсности среды, форму и размер частиц и пор, число фаз, количественные соотношения между фазами и их взаимное расположение в среде, заполняющей поровое пространство, а также многие другие физико-химические параметры грунтового массива. Детальный учет перечисленных факторов при построении математической модели теплового режима системы теплосбора представляет собой весьма серьезную проблему, а зачастую при помощи современного математического аппарата практически не возможен. Однако на практике, как уже отмечалось, при моделировании процессов тепломассопереноса, протекающих в грунтовом массиве системы теплосбора, оказывается возможным, используя разработанную А.Ф. Чудновским модель эквивалентной теплопроводности, с достаточной степенью точности описать эти процессы обычным уравнением теплопроводности. При этом грунт рассматривается как квазиоднородное тело, к которому применимо обычное уравнение теплопроводности, причем его теплотехнические характеристики могут изменяться как по времени, так и по координатам.

Изменение агрегатного состояния поровой влаги в грунте в общем случае имеет два следствия: при перемещении границы замерзания выделяется скрытая теплота фазового перехода и изменяются теплофизические характеристики грунта.

При замораживании грунта объемную теплоту фазового перехода можно определить по следующей формуле:

$$L_v = m \sigma \rho, \quad (1)$$

где:

L_v - объемная теплота фазового перехода, Вт·ч/м³;

m – пористость грунта, доли единицы;

σ - теплота фазового перехода единицы веса воды равная 93 Вт·ч/кг;

ρ - плотность затвердевающего вещества (льда), кг/м³.

При замораживании грунта значение ρ принимается равным 920 кг/м³, а при оттаивании соответственно – 1000 кг/м³.

Рассмотрим задачу замерзания неограниченного грунтового массива с цилиндрической полостью (труба грунтового теплообменника), расчетная схема которого приведена на Рис. 1.

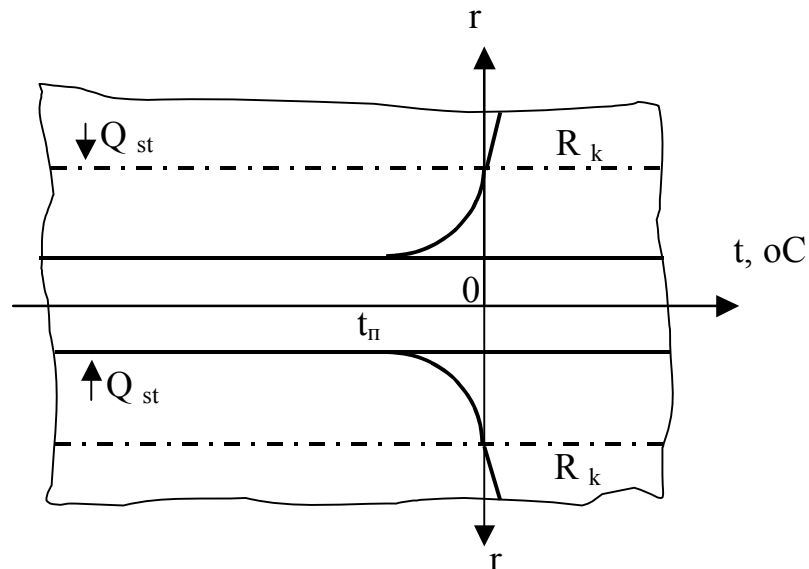


Рис. 1. Расчетная схема задачи замерзания неограниченного тела с цилиндрической полостью

В расчетной схеме, представленной на Рис. 1, приняты следующие обозначения:

R_k – граница замораживания грунта, м;

Q_{st} – плотность теплового потока (на 1 пог. м длины цилиндра) из не замерзшего грунта, Вт/м;

t_p – температура на поверхности цилиндрической полости, °С;

t_o – температура замерзания воды в порах грунтового массива, $t_o = 0^\circ\text{C}$;

t_r – температура грунта на бесконечном удалении от цилиндрической полости (грунтового теплообменника), °С;

R_o – радиус цилиндрической полости – труб грунтового теплообменника, м.

Расчетная схема, представленная на рисунке, фактически иллюстрирует эксплуатационный режим грунтового теплообменника радиусом R_o . Действительно, через некоторое время τ (час) при температуре грунта на контакте с трубой грунтового теплообменника t_p (°С), меньшей $t_o = 0^\circ\text{C}$, в грунтовом массиве образуется область замерзшего грунта, ограниченная радиусом R_k .

Уравнение теплового баланса не замерзшего вокруг теплообменника цилиндра грунта радиусом $r=R_k$ будет выглядеть следующим образом:

$$q_t = q_{st} + q_{ft}, \quad (2)$$

где:

q_t – удельный (на 1 погонный метр длины трубы) тепловой поток к трубе грунтового теплообменника, Вт/пог. м;

q_{st} – удельный тепловой поток из незамерзшего грунта, Вт/пог. м;

q_{ft} – удельный тепловой поток, образующийся в результате выделения скрытой теплоты фазового перехода поровой влаги в замерзающем грунте, Вт/пог.м.

Допустим, что все удельные тепловые потоки условно постоянны и осреднены по времени. Тогда для их определения можно записать следующие выражения:

$$q_t = \frac{2\pi\lambda_{ekv}}{\ln \frac{R_k}{R_o}} (t_o - t_p); \quad (3)$$

$$q_{st} = \frac{2\pi\lambda_g}{\ln \frac{R_k}{R_o}} (t_o - t_p); \quad (4)$$

$$q_{ft} = \frac{L_v \pi (R_k^2 - R_o^2)}{\tau}, \quad (5)$$

где: λ_g - теплопроводность грунта, Вт/м·°С;

λ_{ekv} - эквивалентная теплопроводность грунта, учитывающая выделение скрытой теплоты фазового перехода при замерзании поровой влаги, Вт/м·°С;

τ - время, за которое замерзает грунт в радиусе R_k , часы.

Таким образом, введением λ_{ekv} мы заменили задачу о тепловом режиме замерзшего вокруг труб грунтового теплообменника цилиндра грунта R_k квазистационарной задачей (3) с близким температурным полем, одинаковыми граничными условиями (температуры на границах равны соответственно t_o и t_k), но с другой эквивалентной теплопроводностью λ_{ekv} , которая учитывает фазовый переход влаги в порах грунтового массива.

«Эквивалентная» задача стационарного теплового режима неограниченного грунтового массива с цилиндрической полостью, температурное поле которого совпадает с температурным полем основной задачи (задачи Стефана), представленной на Рис. 1, но в которой не происходит выделения скрытой теплоты фазовых переходов. Очевидно, что

добиться равенства (приблизительного равенства) температурных полей в обеих задачах можно только за счет введения для второй задачи новой теплопроводности грунта - λ_{ekv} , которая фактически представляет собой «некую эквивалентную» теплопроводность грунта, при которой температурные поля обеих задач совпадают или очень близки.

В результате, для того, чтобы учесть в модели теплового режима системы теплосбора процессы, связанные с замораживанием грунта вокруг труб грунтового теплообменника, нам остается определить «эквивалентную» теплопроводность грунта.

Для определения q_{st} используем ту же квазистационарную задачу (4), с теми же граничными условиями, но с действительной теплопроводностью грунта λ_g , Вт/м·°С.

При определении q_{ft} (5) осредним по времени τ количество тепловой энергии, выделившееся при замораживании полого цилиндра с внутренним радиусом R_o и внешним R_k .

Попробуем определить q_{ft} другим образом, для чего, как в выражениях (3) и (4), воспользуемся той же квазистационарной задачей (тепловой поток из незамерзшего грунта равен «0») с теплопроводностью λ_{ft} , которая обеспечивает на грунтовой теплообменник тепловое воздействие, эквивалентное выражению (5). В этом случае выражение для q_{ft} мы можем записать в следующем виде

$$q_{ft} = \frac{2\pi\lambda_{ft}}{\ln\frac{R_k}{R_o}}(t_o - t_p) \quad (6)$$

В итоге, подставив в уравнение (2) выражения (3), (4) и (5), мы можем записать уравнение теплового баланса границы замерзания грунта в новом виде:

$$\frac{2\pi\lambda_{ekv}}{\ln\frac{R_k}{R_o}}(t_o-t_p) = \frac{2\pi\lambda_g}{\ln\frac{R_k}{R_o}}(t_o-t_p) + \frac{2\pi\lambda_{ft}}{\ln\frac{R_k}{R_o}}(t_o-t_p) \quad (7)$$

Сократив все члены уравнения (7) на $\frac{2\pi}{\ln\frac{R_k}{R_o}}(t_o-t_p)$, получим выражение

для определения λ_{ekv}

$$\lambda_{ekv} = \lambda_g + \lambda_{ft} \quad (8)$$

В итоге, эквивалентная теплопроводность грунтового массива системы теплосбора, учитывающая скрытую теплоту фазового перехода поровой влаги, равна действительной теплопроводности грунта, увеличенной на «виртуальную» добавку λ_{ft} , определяемой из следующего уравнения, полученного из равенства выражений (5) и (6):

$$\frac{2\pi\lambda_{ft}}{\ln\frac{R_k}{R_o}}(t_o-t_p) = \frac{L_v\pi(R_k^2-R_o^2)}{\tau} \quad (9)$$

Решив уравнение (9) относительно λ_{ft} , получим искомое выражение для ее определения

$$\lambda_{ft} = \frac{L_v\pi(R_k^2-R_o^2)}{2\pi\tau(t_o-t_p)} \ln\frac{R_k}{R_o} \quad (10)$$

Таким образом, мы определили все неизвестные, необходимые для вычисления эквивалентной теплопроводности грунта λ_{ekv} , кроме R_k .

Для определения R_k рассмотрим ту же квазистационарную задачу (случай, когда $Q_{st} = 0$.) и запишем уравнение теплового баланса на границе замораживания грунта

$$-\lambda_1 \frac{t_o - t_p}{R_k \ln \frac{R_o}{R_k}} = L_v \frac{dR_k}{d\tau}. \quad (11)$$

Решение этого уравнения выглядит следующим образом [1]:

$$\eta_k^2 \left(\ln \eta_k - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{2} = 2 \Pi_l, \quad (12)$$

где:

$$\Pi_l = \frac{\lambda_1 \tau (t_o - t_p)}{L_v R_o^2}; \quad \eta_k = \frac{R_k}{R_o}; \quad (13)$$

λ_1 - теплопроводность грунта в мерзлом состоянии, Вт/м²·°С.

С помощью обозначений (13) решение уравнения (12) относительно R_k может быть легко получено, например итерационным методом.

Очевидно, что эквивалентная теплопроводность грунта системы теплосбора, определяемая по предлагаемой в данной статье методике, зависит от радиуса труб грунтового теплообменника, «рабочей» температуры теплоносителя системы теплосбора, влажности грунта и продолжительности периода потребления тепловой энергии из грунта – отопительного периода.

Рассмотрим подробнее влияние этих параметров на эквивалентную теплопроводность грунтового массива системы теплосбора.

В таблице 1 приведены значения эквивалентной теплопроводности грунтового массива системы теплосбора, состоящего из слоев тяжелой глины, при разных радиусах труб грунтового теплообменника. При этом влажность грунта принималась равной 15%, теплопроводность по ASHRAE (Американское общество инженеров по отоплению, вентиляции и

кондиционированию зданий) $2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, а продолжительность периода потребления энергии из грунта варьировалась в пределах 3000-30000 часов.

Таблица 1.

Эквивалентная теплопроводность грунта $\lambda_{\text{экв}}$, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ и радиус намораживаемой ледяной линзы $R_{\text{л}}$, м. В числителе $\lambda_{\text{экв}}$ в знаменателе $R_{\text{л}}$

Радиус труб грунтового теплообменника, м	Продолжительность отбора тепла, час				
	3000	5000	8000	15000	30000
температура теплоносителя системы теплосбора -2°C					
0,02	4,31/0,77	4,30/0,96	4,28/1,18	4,26/1,56	4,24/2,1
0,05	4,40/0,88	4,38/1,1	4,36/1,34	4,33/1,75	4,30/2,36
0,08	4,48/0,97	4,44/1,19	4,41/1,44	4,37/1,88	4,34/2,52
0,1	4,52/1,01	4,48/1,24	4,44/1,50	4,40/1,95	4,36/2,6
0,15	4,60/1,11	4,55/1,35	4,51/1,63	4,54/2,09	4,41/2,78
температура теплоносителя системы теплосбора -10°C					
0,02	4,26/1,55	4,25/1,95	4,23/2,41	4,22/3,2	4,20/4,37
0,05	4,33/1,75	4,31/2,18	4,28/2,66	4,27/3,53	4,25/4,80
0,08	4,37/1,88	4,35/2,33	4,32/2,85	4,30/3,74	4,27/5,06
0,1	4,40/1,95	4,39/2,41	4,35/2,94	4,32/3,85	4,29/5,2
0,15	4,45/2,09	4,42/2,58	4,39/3,13	4,35/4,08	4,32/5,49

Анализируя значения эквивалентной теплопроводности грунта, представленные в таблице 1 можно сделать следующие выводы:

-эквивалентная теплопроводность грунтового массива очень слабо зависит от продолжительности периода потребления тепловой энергии из грунта, причем с увеличением этого периода эквивалентная теплопроводность грунта убывает;

-эквивалентная теплопроводность грунтового массива очень слабо зависит от температуры теплоносителя системы теплосбора, причем с

понижением этой температуры эквивалентная теплопроводность грунта убывает.

Учитывая первые два вывода, для проведения инженерных расчетов вертикальных систем сбора низкопотенциального тепла грунта (радиус труб грунтовых теплообменников 0,08- 0,1 м) могут быть рекомендованы значения эквивалентной теплопроводности грунтового массива систем теплосбора, наблюдающиеся при температуре теплоносителя равной (-10 °С) при продолжительности периода отбора тепла из грунта, превышающей 30000 ч.

С учетом сформулированных рекомендаций, по представленной в данном параграфе методике для вертикальных систем сбора низкопотенциального тепла грунта, как для наиболее перспективных в климатических условиях России, была определена эквивалентная теплопроводность грунтов по классификации ASHRAE. Результаты расчетов представлены в Таблица 2таблице 2.

Таблица 2

Эквивалентная теплопроводность грунтов, учитывающая скрытую теплоту фазового перехода поровой влаги (грунты по классификации ASHRAE)

Класс грунта	$\lambda_{\text{экв}}$ Вт/(м·°С)	Тип грунта
Очень низкая теплопроводность	<2,2	Легкая глина (15% влажность)
Низкая теплопроводность	<3,2	Тяжелая глина (5% влажность)
Нормальная теплопроводность	<4,3	Тяжелая глина (15% влажность) Легкий песок (15% влажность)
Высокая теплопроводность	<5,4	Тяжелый песок (5% влажность)
Очень высокая теплопроводность	>5,4	Тяжелый песок (15% влажность)

Анализ значений эквивалентной теплопроводности грунтов, учитывающей скрытую теплоту фазового перехода поровой влаги в грунте,

показывает, что влияние эффекта «нулевой завесы» достаточно велико и его необходимо учитывать при проектировании теплонасосных систем сбора тепла грунта, эксплуатируемых в отрицательных температурах.

В таблице 3 представлены значения эквивалентной теплопроводности грунтов по классификации СНиП 2.02.04-88 [2], причем в таблице представлена как эквивалентная теплопроводность грунтов для горизонтальных систем теплосбора систем с радиусом труб грунтового теплообменника 0,025 м, так и для вертикальных систем теплосбора – с радиусом труб грунтового теплообменника -0,1 м.

Таблица 3

Эквивалентная теплопроводность грунтов,
учитывающая скрытую теплоту фазового перехода поровой влаги (грунты
по классификации СНиП 2.02.04-88)

Плотность сухого грунта $\rho_{дх}, \rho_{г},$ $\tau / \text{м}^3$	Суммарная влажность грунта $W_{вт},$ доли единицы	Эквивалентная теплопроводность грунта, Вт/(м·°С) ($\lambda_{\text{ЭКВ}}^Г$ —для горизонтальных систем; $\lambda_{\text{ЭКВ}}^В$ —для вертикальных систем)								Объемная теплоемкость грунта, Дж/ (м ³ ·°С) 10 ⁴ [ккал/ (м ³ ·°С)]	
		Пески разной крупности и гравелист ые		Супеси пылеват ые		Суглинки и глины		Заторфо- ванные грунты и торфы		$C_{ш}$	C_f
		$\lambda_{\text{ЭКВ}}^Г$	$\lambda_{\text{ЭКВ}}^В$	$\lambda_{\text{ЭКВ}}^Г$	$\lambda_{\text{ЭКВ}}^В$	$\lambda_{\text{ЭКВ}}^Г$	$\lambda_{\text{ЭКВ}}^В$	$\lambda_{\text{ЭКВ}}^Г$	$\lambda_{\text{ЭКВ}}^В$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,1	9,00	-	-	-	-	-	-	1,74	1,79	4,00 (950)	2,31 (550)
0,1	6,00	-	-	-	-	-	-	0,86	0,90	2,73 (650)	1,68 (400)
0,1	4,00	-	-	-	-	-	-	0,5	0,52	1,88 (450)	1,26 (300)
0,1	2,00	-	-	-	-	-	-	0,26	0,28	1,05 (250)	0,64 (200)
0,2	4,00	-	-	-	-	-	-	1,74	1,79	3,78 (900)	2,40 (570)
0,2	2,00	-	-	-	-	-	-	0,5	0,52	2,10 (500)	1,47 (350)
0,3	3,00	-	-	-	-	-	-	1,99	2,05	4,15 (990)	2,40 (570)
0,3	2,00	-	-	-	-	-	-	0,88	0,92	3,32 (750)	2,10 (500)
1,4	0,35	-	-	3,81	3,89	3,32	3,40	-	-	3,35	2,35

										(800)	(560)
1,4	0,30	-	-	3,68	3,76	3,07	3,14	-	-	3,02 (720)	2,18 (520)
1,4	0,25	4,03	4,12	3,32	3,39	2,82	2,88	-	-	2,78 (660)	2,06 (490)
1,4	0,20	3,32	3,38	2,82	2,87	2,33	2,37	-	-	2,48 (590)	1,89 (450)
1,4	0,15	2,93	2,99	2,32	2,37	1,84	1,88	-	-	2,18 (520)	1,76 (420)
1,4	0,10	2,32	2,36	1,96	2,00	1,48	1,51	-	-	1,89 (450)	1,74 (415)
1,4	0,05	1,57	1,61	1,35	1,37	0,97	0,99	-	-	1,60 (380)	1,47 (350)
1,6	0,30	-	-	3,93	4,02	3,56	3,63	-	-	1,84 (835)	2,48 (590)
1,6	0,25	5,28	5,37	3,80	3,88	3,20	3,26	-	-	3,15 (750)	2,35 (560)
1,6	0,20	4,53	4,62	3,42	3,49	2,81	2,87	-	-	2,31 (670)	2,14 (510)
1,6	0,15	3,79	3,86	3,06	3,12	2,32	2,37	-	-	2,48 (590)	2,02 (480)
1,6	0,10	3,05	3,11	3,41	3,47	1,84	1,87	-	-	2,16 (515)	1,80 (430)
1,6	0,05	2,21	2,24	1,70	1,74	1,20	1,22	-	-	1,83 (435)	1,68 (400)
1,8	0,20	5,63	5,72	3,93	4,00	3,32	3,38	-	-	3,17 (755)	2,41 (575)
1,8	0,15	4,76	4,84	3,54	3,60	2,93	2,99	-	-	2,78 (600)	2,26 (540)
1,8	0,10	4,14	4,21	3,05	3,11	2,21	2,26	-	-	2,42 (575)	2,04 (485)
1,8	0,05	3,04	3,09	2,1	2,12	1,47	1,50	-	-	2,04 (485)	1,89 (450)
2,0	0,10	5,73	5,82	3,66	3,72	2,69	2,74	-	-	2,68 (640)	2,26 (540)
2,0	0,05	4,4	4,46					-	-	2,26 (540)	2,10 (500)

Обозначения, принятые в таблице:

$\lambda_{\text{ЭКВ}}^{\Gamma}$ – эквивалентная теплопроводность грунта для горизонтальных систем;

$\lambda_{\text{ЭКВ}}^{\text{В}}$ – эквивалентная теплопроводность грунта для вертикальных систем

$C_{\text{тл}}, C_{\text{ф}}$ – объемная теплоемкость соответственно талого и мерзлого грунта;

$\rho_{\text{д тл}}, \rho_{\text{д ф}}$ – плотность соответственно талого и мерзлого грунта в сухом состоянии.

Библиографический список .

1. Пехович А.И., В.М. Жидких. Расчеты теплового режима твердых тел. Ленинградское отделение издательства «Энергия». Ленинград, 1976 г. 350 с.
2. 1995 ASHRAE Application Handbook, Chapter 33: Owning and Operating Costs, American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers, Inc.
3. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты вечномёрзлых грунтов.

