

ТЕПЛООБМЕН ПОДЗЕМНОГО РЕЗЕРВУАРА С МЕРЗЛЫМИ ГРУНТАМИ В ПРОЦЕССЕ ЗАПОЛНЕНИЯ ЕГО ВОДОЙ

Г.П. Кузьмин

Институт мерзлотоведения СО РАН им. акад. П. И. Мельникова, 677018, г. Якутск, Россия

Показана необходимость изучения теплового взаимодействия подземных резервуаров с окружающими мерзлыми грунтами в период заполнения их водой и приведены результаты экспериментального изучения теплообмена.

Подземный резервуар, теплообмен, температура воды

HEAT EXCHANGE BETWEEN AN UNDERGROUND RESERVOIR AND FROZEN SOILS DURING FILLING THEM WITH WATER

G. P. Kuzmin

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 677018, Yakutsk, Russia

The paper examines thermal interaction between underground reservoirs and surrounding frozen soils during filling with water. Results of the experimental study of heat exchange are presented.

Underground reservoir, heat exchange, water temperature

ВВЕДЕНИЕ

В зоне распространения многолетнемерзлых грунтов при решении задач питьевого и технического водоснабжения небольших населенных пунктов и отдельных объектов целесообразно использовать подземные резервуары. В них можно хранить запасы воды для бытовых нужд, противопожарных целей, водоснабжения животноводческих ферм и т. д.

Изучение теплового воздействия воды на мерзлые грунты является одной из главных задач проблемы подземного ее хранения. Теплопередача от воды к окружающим грунтам происходит в течение всего времени ее хранения вследствие разности их температур и тепловыделений при фазовом переходе воды в лед. Наиболее интенсивно передача тепла развивается в период заполнения резервуара, когда происходит принудительное перемешивание воды и температура ее значительно отличается от начальной температуры и температуры фазовых переходов окружающих мерзлых грунтов. Поэтому изучение теплообмена в этот период является необходимым.

В процессе теплообмена между водой и стенкой хранилища происходит изменение теплового состояния окружающих грунтов, которое может сопровождаться фазовыми превращениями поровой влаги окружающих грунтов или воды в хранилище. Если плотность теплового потока, подводимого к стенке резервуара, превышает плотность теплового потока, отводимого от стен-

ки в глубь массива, то происходит протаивание грунтовой стенки или ледяной облицовки. После остывания воды до определенной температуры, когда плотность теплового потока, подводимого от воды к стенке хранилища, становится меньше плотности теплового потока, отводимого в глубь массива, происходит намораживание льда.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Развитие и интенсивность процесса протаивания мерзлых грунтов стенки резервуара или ледяной облицовки определяются температурой воды, скоростью ее поступления в резервуар, температурой и теплофизическими характеристиками грунта. Температура заливаемой воды и скорость заполнения резервуара являются регулируемыми параметрами, путем их изменения можно управлять процессом протаивания ледяной облицовки подземного хранилища. Для расчетов оптимальной скорости заполнения резервуаров водой в зависимости от температуры заливаемой воды и толщины ледяной облицовки, образующейся при длительном хранении воды, необходимо знание коэффициента теплоотдачи, формирующегося в период заполнения резервуара.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальное определение местного значения коэффициента теплоотдачи в каждый

данный момент времени нестационарного процесса является сложной технической задачей. Нами были выполнены экспериментальные определения среднего значения коэффициента теплоотдачи α по боковой поверхности и днищу вертикальных выработок цилиндрической формы в период заполнения их водой.

Суммарные количества теплоты, теряемой водой и передаваемой через боковую поверхность и днище резервуара при отсутствии или незначительном протаивании его стенок, температура которых принята равной 0°C , можно представить зависимостями

$$Q = c_1 V (\vartheta_0 - \bar{\vartheta}_{1k}); \quad (1)$$

$$Q = \alpha (S_1 + S_2) \bar{\vartheta}_1 \tau, \quad (2)$$

где c_1 — удельная теплоемкость воды; V — объем залитой воды; ϑ_0 — температура заливаемой воды; $\bar{\vartheta}_{1k}$ — средняя по высоте конечная температура воды в резервуаре; S_1 и S_2 — средние за весь период заполнения значения площадей боковой поверхности и днища резервуара, по которым происходит теплообмен с окружающими грунтами; $\bar{\vartheta}_1$ — средняя температура воды в резервуаре за весь период его заполнения; τ — продолжительность заполнения.

Конечный объем воды и средние значения площадей теплообменных поверхностей в формулах (1) и (2) выражаются через начальные и конечные параметры резервуара (рис. 1) формулами

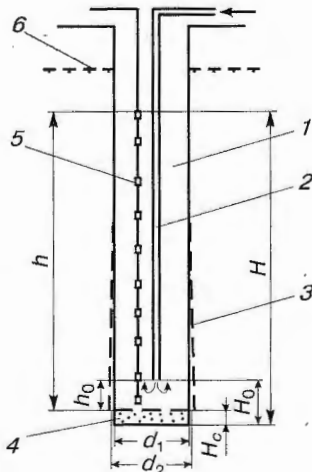


Рис. 1. Схема проведения экспериментов по изучению теплообмена заполняемой водой выработки с мерзлыми грунтами.

1 — выработка; 2 — сливной шланг; 3 — граница протаивания и обрушения грунта; 4 — осыпавшийся грунт; 5 — датчики температуры; 6 — граница сезонного протаивания.

$$V = \frac{\pi d_2^2}{4} h,$$

$$S_1 = \frac{\pi (d_1 + d_2)}{2} h, \quad (3)$$

$$S_2 = \frac{\pi d_1^2}{4},$$

где d_1 и d_2 — начальный и конечный диаметры резервуара; h — конечная высота столба воды.

Из условия равенства (1) и (2) с учетом (3) находим выражение для определения среднего коэффициента теплоотдачи

$$\alpha = \frac{d_2^2 h}{h (d_1 + d_2) + d_1^2} \frac{c_1 (\vartheta_0 - \bar{\vartheta}_{1k})}{\bar{\vartheta}_1 \tau}. \quad (4)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты по изучению теплообмена в период заполнения подземных выработок водой

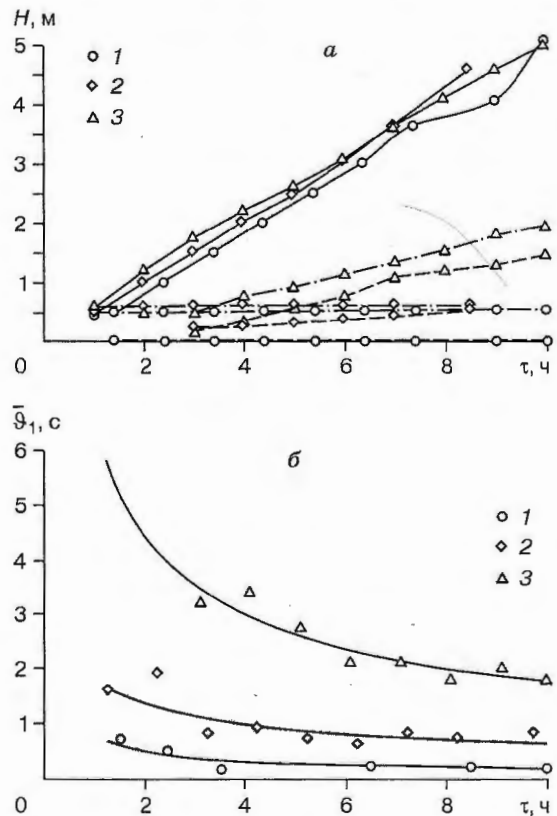


Рис. 2. Графики изменения результатов наблюдений во времени при заполнении скважин водой с температурой $2,8$ (1); $10,1$ (2) и $23,2$ $^\circ\text{C}$ (3).

а — изменения во времени суммарной высоты столба воды и грунта H (сплошная), высоты расположения сливного планга H_0 (штрих-пунктирная) и толщины осыпавшегося слоя грунта H_c (пунктирная); б — изменения во времени средней по высоте температуры воды.

проводились в трех скважинах с начальным диаметром 650 мм и глубиной 7,5 м, а также в подземном резервуаре со средним диаметром 13,4 м и глубиной расположения днища на глубине 19,1 м. Все выработки были пройдены в песчаных мелкозернистых грунтах со средней влажностью 0,24. Эксперименты проводились в разное время, поэтому естественная температура грунтов на площадках была различной.

Начальная температура воды в скважинах была 2,8; 10,1 и 23,2 °С, а в резервуаре — 2,0 °С.

В процессе заполнения выработок водой периодически измеряли температуру подаваемой воды ϑ_0 , температуру воды в выработке ϑ_1 и диаметр выработки d_2 на разных уровнях, положения уровней воды H , дна выработки H_c и конца сливного шланга H_0 (см. рис. 1). Результаты наблюдений в скважинах представлены на рис. 2. Уровень воды в скважинах поднимался со скоростью около 0,5 м/ч. Положение дна скважины и конца сливного шланга изменялись в том случае, если происходило протаивание и сползание грунта в скважину (рис. 2,а). Температура воды ϑ_1 (см. рис. 2,б) имеет затухающий во времени характер. Скорость ее изменения и продолжительность стабилизации зависят от начальной температуры ϑ_0 и времени заполнения. Чем выше ϑ_0 , тем интенсивнее скорость падения ϑ_1 на начальных этапах заполнения и больше продолжительность затухания.

Экспериментальные и расчетные данные приведены в таблице.

Как видно из таблицы, значения α при одинаковых геометрических размерах скважин и почти одинаковой продолжительности заполнения их водой с разной температурой (опыт 1—3)

Основные результаты наблюдений и расчетов

№ опыта	d_1 , м	d_2 , м	h , м	ϑ_0 , °С	$\bar{\vartheta}_1$, °С	$\bar{\vartheta}_{1k}$, °С	τ , ч	α , Вт/ /м ² · К
1	0,65	0,65	5,0	2,8	0,3	0,2	10,0	308
2	0,65	0,66	4,0	10,1	1,0	0,7	8,25	407
3	0,65	0,81	3,5	23,2	2,4	1,8	10,1	426
4	13,4	13,4	8,1	2,0	0,3	0	96,0	296

отличаются. Однако значительное повышение ϑ_0 не приводит к очень существенному росту α . Так, при начальных температурах воды 2,8 и 23,2 °С расчетные значения α равны соответственно 308 и 426 Вт/(м² · К).

Протаивание стенок наблюдалось в скважинах, в которые подавалась вода с температурой 10,1 и 23,2 °С. Частицы протаявшего слоя грунта отрывались от массива и накапливались на дне скважины. Средние диаметры скважин к концу экспериментов достигли соответственно 0,66 и 0,81 м.

Оценим количество тепла, неучтенное при расчетах α , путем сравнения их с суммарными потерями тепла водой. Общее количество тепла, переданное водой к окружающим грунтам, находится по формуле (1). Количество тепла, затраченное на нагрев до конечной температуры воды оттаявшего и попавшего на дно скважины грунта, определяется как $Q_1 = c_2 \pi (d_2^2 - d_1^2) h \bar{\vartheta}_{1k} / 4$, где c_2 — теплоемкость талого грунта. При $c_2 = 3233$ кДж/(м³ · К) и $\gamma_{ск} = 1600$ кг/м³ для опыта 2 $Q_1/Q = 0,002$ и для опыта 3 — $Q_1/Q = 0,02$.

Таким образом, представляется возможным определение коэффициента теплоотдачи от воды к стенкам резервуара в период его заполнения по величине изменения теплосодержания воды.

Поступила в редакцию
14 апреля 1998 г.