

## ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ. СПЕЦИАЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 627.8

**В.В. Малаханов**

*ФГБОУ ВПО «МГСУ»*

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН

Рассмотрены измерения температуры фильтрующейся воды в грунтовых плотинах могут быть использованы для определения коэффициентов фильтрации грунтов и мониторинга состояния грунтовых плотин.

Изменение температуры в грунтовых водах происходит в результате процессов теплопроводности и конвекции. Анализ теплопередачи в грунтовых плотинах показал, что тепловые волны в них перемещаются со скоростью  $(4...6) \times 10^{-7}$  м/с, поэтому при фильтрации воды в грунтах с коэффициентом фильтрации меньше  $4 \times 10^{-7}$  м/с тепловые волны распространяются в результате теплопроводности. В грунтах с коэффициентом фильтрации больше  $2 \times 10^{-5}$  м/с тепловые волны перемещаются вынужденной конвекцией, т.е. фильтрационным потоком.

Температурные наблюдения за фильтрацией на грунтовых плотинах из несвязных грунтов позволяют вычислить осредненные значения коэффициентов фильтрации грунтов с погрешностью не более 20...40 %, что точнее, чем с использованием других натуральных методов (откачки, индикаторов и др.).

Температурные наблюдения за фильтрацией на грунтовых плотинах из связных грунтов позволяют контролировать плотность и водопроницаемость грунтов и количественно определять теплопроводность грунтов.

Показано, что движение тепловой волны в несвязных грунтах приводит к тому, что фильтрационный поток не может находиться в стационарном состоянии. В результате этого в фильтрационном потоке возникают сложные вторичные течения воды, вызванные естественной конвекцией (градиентом температур), которые являются основной причиной известных аномалий в изменении кривых депрессий в грунтовых плотинах.

**Ключевые слова:** пьезометрические наблюдения, измерение температуры фильтрующейся воды, грунтовые плотины, коэффициент фильтрации грунтов, мониторинг грунтовых плотин.

Гидротехнические сооружения по последствиям возможных аварий относятся к категории наиболее ответственных сооружений, для контроля состояния которых на них размещают сотни, а иногда и тысячи средств измерений и ведут постоянные инструментальные и визуальные наблюдения. На гидросооружениях выполняют наблюдения за деформациями, напряжениями, фильтрацией воды, температурой и другие. Температурные наблюдения за фильтрационным потоком в теле грунтовых плотин входят в состав рекомендуемых видов натуральных исследований гидротехнических сооружений. Наибольшее распространение температурные наблюдения получили на грунтовых плотинах, возведенных в районах вечной мерзлоты, для которых контроль положения нулевой ( $0^\circ$ ) изотермы позволяет судить о надежности противofильтрационных устройств [1, 2].

Для грунтовых плотин, построенных вне зоны вечной мерзлоты, температурные наблюдения не получили большого распространения, и в первую оче-

редь ввиду слабого научного и методического обоснования их применимости [3]. Эксплуатационный персонал гидроузлов, ведущий натурные наблюдения, не заинтересован в проведении температурных измерений, так как не видит в них практической пользы для анализа состояния грунтовых плотин, а существующие публикации на этот счет лишь убеждают их в этом. Так, известные специалисты-гидротехники по фильтрационным наблюдениям В.И. Аравин и О.Н. Носова отмечали: «Сведения о закономерностях изменения температуры фильтрационного потока дают возможность *только качественно* оценить фильтрационный режим» [4, с. 108]. Вместе с тем, накопленный опыт температурных наблюдений на грунтовых плотинах говорит о практической его значимости и ставит задачу обобщения и научного обоснования [5, 6].

В данной работе показано, как температурные фильтрационные наблюдения на грунтовых плотинах позволяют определить коэффициенты фильтрации грунтов, его теплофизические характеристики и служат для оценки изменения плотности и водопроницаемости грунтов плотин в процессе длительной эксплуатации и влияния их на надежность грунтовых плотин и их оснований.

**1. Постановка задачи.** Температурный режим грунтовых плотин зависит от их конструкции и климатических условий: температуры воздуха и воды, количества солнечной радиации, теплового состояния основания и теплового режима водохранилища. В результате измерений температуры воды фильтрационного потока в пьезометрах эксплуатационный персонал получает информацию о характере изменения во времени температуры воды. Изменение температуры воды в пьезометрах носят циклический характер, связанный с изменением в течение года температуры воздуха и поверхностной толщи воды в водохранилище (рис. 1).

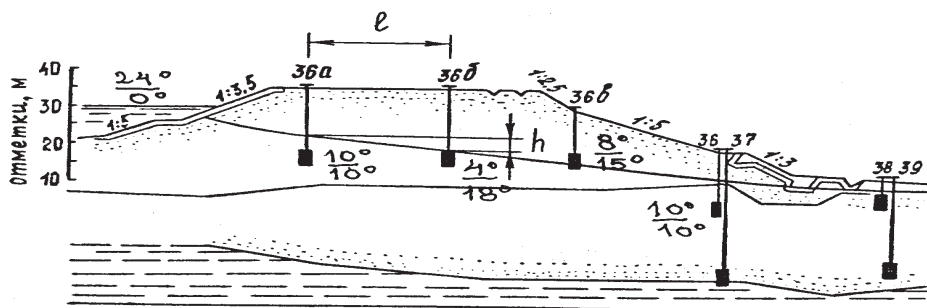


Рис. 1. Поперечный профиль земляной плотины. У каждого пьезометра представлены температуры воды: в числителе — измеренная 01.08.1963 г., а в знаменателе — измеренная 01.01.1964 г.

На рис. 2 приведены результаты температурных наблюдений за фильтрационным потоком, полученные в одном из створов намывной плотины Волгоградского гидроузла [6]. Видно, что характер изменения температуры воды в водохранилище и в пьезометрах обусловлен годичным циклом изменения температуры воздуха в этом районе, а изменение температуры воды в пьезометрах запаздывает по фазе и происходит с уменьшающейся амплитудой по мере удаления рассматриваемого пьезометра от верхового откоса плотины. Таким образом, температурные наблюдения в каждом пьезометре позволяют получить две характеристики теплового потока: сдвиг во времени  $\Delta t$  максимумов температур в водохранилище и в соответствующем пьезометре или в соседних пьезометрах, который представляет собой время движения тепловой волны, и перепад максимальных температур воды  $\Delta t$  в водохранилище и в пьезометре или в соседних пьезометрах.

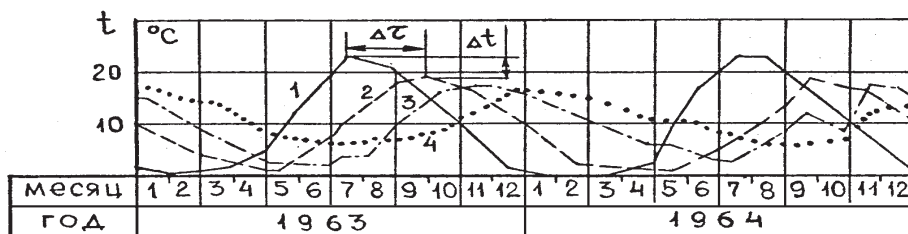


Рис. 2. Графики изменения во времени температуры воды в водохранилище и в пьезометрах: 1 — в водохранилище; 2, 3, 4 — в теле земляной плотины соответственно в пьезометрах 36а, 36б, 36в;  $\Delta t$  — сдвиг во времени максимумов температур в водохранилище и пьезометре;  $\Delta \tau$  — перепад максимальных температур воды в водохранилище и пьезометре

Обе эти характеристики зависят от водопроницаемости и теплофизических свойств грунта плотины. Регистрация характеристик  $\Delta t$  и  $\Delta \tau$  в процессе длительной эксплуатации позволяет интегрально оценивать плотность грунтов земляных плотин, так как водопроницаемость и теплофизические свойства грунтов напрямую зависят от плотности. При развитии в ходе эксплуатации процессов самоуплотнения грунтов характеристики теплового потока: сдвиг во времени  $\Delta t$  и перепад максимальных температур воды  $\Delta \tau$ , будут увеличиваться, а при прекращении процесса самоуплотнения будут оставаться неизменными. При развитии же в грунтах аварийно опасных процессов разуплотнения, вызванных, например, суффозией грунтов или контактным размывом, эти характеристики теплового потока будут уменьшаться, что является диагностическим показателем ухудшения свойств грунтов.

Прежде чем рассмотреть вопрос о применимости величин  $\Delta t$  и  $\Delta \tau$  для оценки состояния грунтовых плотин, необходимо проанализировать процессы теплопроводности в грунтовых плотинах. Передача тепла в водонасыщенных грунтах в основном осуществляется в результате процессов теплопроводности и конвекции [2].

Для оценки процесса молекулярного переноса теплоты, определяемого теплопроводностью материала, необходимо знать две из трех теплофизических характеристик:  $\alpha$  — коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $c_v$  — объемную теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{м}^3 \times ^\circ\text{C})$ ;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м} \times ^\circ\text{C})$ . Эти характеристики связаны известным соотношением:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_v}. \quad (1)$$

Конвекция как процесс передачи теплоты при перемещении теплоносителя (воды) может быть естественной и вынужденной. Естественная конвекция проявляется под действием градиента температуры и изменения плотности теплоносителя. Под вынужденной конвекцией понимают процесс распространения тепла в результате движения теплоносителя под действием внешних сил, например, в результате движения фильтрующейся воды под действием разности давления. В этом случае скорость распространения тепла определяется скоростью движения теплоносителя (фильтрационного потока).

В результате взаимодействия указанных трех видов теплопередачи: теплопроводности, естественной и вынужденной конвекции происходит перемещение тепловой волны в теле грунтовой плотины. Скорость движения тепловой волны и изменение ее амплитуды определяется как теплофизическими свойствами водонасыщенного грунта, так и скоростью фильтрации воды в порах грунта. Поэтому, прежде всего, поставим задачу: определить при каких условиях (в каких грунтах) преобладает тот или иной вид теплопередачи.

**2. Определение скорости движения тепловой волны в грунтах при теплопроводности.** При перемещении тепловой волны в результате теплопроводности задача сводится к определению скорости движения тепловой волны в водонасыщенном грунте, в котором вода либо стоит в порах грунта, либо фильтрует со скоростью значительно меньшей скорости движения тепловой волны.

Изменение во времени  $\tau$ , температуры воды  $t$  в поверхностной толще водохранилища можно аппроксимировать формулой вида [7]

$$t = t_m \cos(2\pi\tau/\tau_0), \quad (2)$$

где  $t_m$  — максимальная амплитуда температуры воды, отсчитываемая от средней температуры;  $\tau_0$  — период колебаний, равный одному году, т.е.  $\tau_0 = 1 \text{ год} = 8760 \text{ ч} = 3,1536 \times 10^7 \text{ с}$ . В результате теплопроводности в грунте будет перемещаться тепловая волна длиной  $l$ , равной

$$l = 2\sqrt{\pi\alpha\tau_0}, \quad (3)$$

и с затухающей максимальной амплитудой  $t'$ , равной

$$t' = t_m e^{-E\sqrt{\frac{\pi}{\alpha\tau_0}}}, \quad (4)$$

где  $x$  — координата рассматриваемой точки в толще грунта (рис. 3).

Скорость распространения тепловой волны определяется по формуле

$$u = 2\sqrt{\frac{\pi\alpha}{\tau_0}}. \quad (5)$$

Определим скорость движения тепловой волны  $u$  для водонасыщенных грунтов: песка, супеси, суглинка (глины) и торфа — при различных объемных весах скелета грунта и его влажности (табл. 1). Теплофизические характеристики грунта заимствованы из [8].

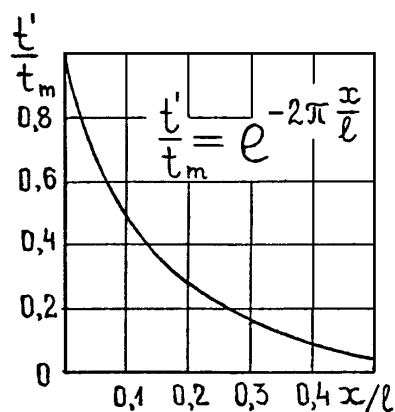


Рис. 3. Изменение относительной амплитуды тепловой волны в теле земляной плотины:  $t_m$  — максимальная амплитуда тепловой волны в водохранилище;  $t'$  — амплитуда тепловой волны на расстоянии  $x$  от напорного откоса;  $l$  — длина тепловой волны

Табл. 1. Теплофизические свойства грунтов и скорость движения тепловой волны  $u$

Грунт	Объемный вес сухого грунта, кН/м <sup>3</sup>	Суммарная влажность грунта, доли единицы	$\lambda$ , Вт/(м °С)	$c_v$ , Дж/(м <sup>3</sup> ×°С)	$\alpha$ , 10 <sup>-7</sup> м <sup>2</sup> /с	$u$ , 10 <sup>-7</sup> м/с
Песок	14,0	0,25	1,91	2,78	6,94	5,26
	16,0	0,25	2,65	3,15	7,96	5,63
	18,0	0,20	2,67	3,17	8,46	5,81
	20,0	0,10	2,73	2,68	10,20	6,38
Супесь	14,0	0,35	1,80	2,78	5,38	4,63
	16,0	0,30	1,86	3,15	5,32	4,60
	18,0	0,20	1,86	3,17	5,89	4,84
	20,0	0,10	1,74	2,68	6,51	5,09

Окончание табл. 1

Грунт	Объемный вес сухого грунта, кН/м <sup>3</sup>	Суммарная влажность грунта, доли единицы	$\lambda$ , Вт/(м °С)	$c_v$ , Дж/(м <sup>3</sup> ×°С)	$\alpha$ , 10 <sup>-7</sup> м <sup>2</sup> /с	$u$ , 10 <sup>-7</sup> м/с
Суглинок (глина)	14,0	0,35	1,57	2,78	4,69	4,32
	16,0	0,30	1,68	3,15	4,82	4,38
	18,0	0,20	1,57	3,17	4,97	4,45
	20,0	0,10	1,28	2,68	4,77	4,36

Расчеты показали, что скорость движения тепловой волны в различных грунтах при передаче тепла теплопроводностью изменяется в диапазоне от  $3 \times 10^{-7}$  до  $6 \times 10^{-7}$  м/с. Очевидно, что при скоростях движения воды в грунтовых плотинах менее  $3 \times 10^{-7}$  м/с скорость движения тепловой волны определяется теплопроводностью, а при скоростях более  $6 \times 10^{-7}$  м/с — в основном вынужденной конвекцией, т.е. скоростью движения воды в порах грунта.

Как известно, скорость фильтрации  $v$  при ламинарном движении жидкости в порах грунта подчиняется закону Дарси

$$v = kI = -k \frac{dh}{dx}, \quad (6)$$

где  $k$  — коэффициент фильтрации, см/с;  $I = -\frac{dh}{dx}$  — градиент напора, под действием

которого происходит движение воды. Скорость фильтрации  $v$  является осредненной характеристикой движения воды. Реальная скорость  $w$  движения воды в порах грунта с пористостью  $n$  связана со скоростью фильтрации  $v$  соотношением

$$v = wn, \quad (7)$$

так как  $v = kI$ , то

$$k = w \frac{n}{I}. \quad (8)$$

Формула (8) позволяет определить для каких грунтов передача тепла происходит теплопроводностью, а для каких — конвекцией.

Известно, что пористость грунтов, укладываемых в тело грунтовых плотин, в основном лежит в диапазоне  $n = 0,30 \dots 0,40$ , а градиенты фильтрационного потока изменяются от 1,0 на верховом откосе до сотых долей единицы внутри тела плотины, т.е.  $I = 1,0 \dots 0,01$ . Принимая реальную скорость движения воды  $w$  в порах грунтов равной скорости  $u$  движения тепловой волны, вычисляем коэффициенты фильтрации грунтов по формуле (7) при  $n = 0,3$  и при двух значениях градиента

$$1) I = 1,0; k = 6 \times 10^{-7} \frac{0,3}{1,0} = 1,8 \times 10^{-7} \text{ м/с}; 2) I = 0,01; k = 6 \times 10^{-7} \frac{0,3}{0,01} = 1,8 \times 10^{-5} \text{ м/с}.$$

Эти расчеты показывают, что только в песчаных грунтах с коэффициентом фильтрации более  $2 \times 10^{-5}$  м/с скорость движения воды в порах превышает скорость движения тепловой волны (5), а значит в этих грунтах передача тепла идет в основном вынужденной конвекцией и определяется скоростью движения фильтрующейся воды в порах грунта. В связных грунтах (супесях, суглинках и глинах), для которых коэффициенты фильтрации значительно меньше  $2 \times 10^{-5} \dots 2 \times 10^{-7}$  м/с, движение тепловой волны определяется теплопроводностью и имеет скорость  $u$ .

**3. Определение коэффициента фильтрации несвязных грунтов по результатам температурных измерений.** Полученные результаты позволяют более четко определить область применения температурных наблюдений за фильтрацией воды в грунтовых плотинах и нескальных основаниях.

В песчаных грунтах с коэффициентами фильтрации более  $2...4 \times 10^{-5}$  м/с температурные исследования могут служить для определения в натуре осредненных значений коэффициентов фильтрации грунта между пьезометрами по формуле (6). Скорость фильтрации  $v$  может быть вычислена по формуле  $v = l/\Delta t$ , т.е. как отношение расстояния между пьезометрами  $l$  к времени движения тепловой волны от одного до другого пьезометра  $\Delta t$ . По разности показаний уровней воды  $\Delta h$  в пьезометрах можно вычислить осредненный градиент напора  $I = \Delta h/l$ . Тогда формула для определения коэффициента фильтрации грунта по результатам температурных наблюдений примет следующий вид

$$k_f = \frac{l^2}{\Delta t \Delta h}. \quad (9)$$

В табл. 2. приведено сравнение значений коэффициентов фильтрации песков в теле грунтовой плотины Волгоградского гидроузла, полученных методом откачки и по формуле (9). Как видим, полученные результаты определения коэффициентов фильтрации  $k_f$  по времени движения тепловой волны хорошо совпадают со значениями коэффициентов фильтрации  $k_{\phi}$ , полученными по результатам опытных откачек воды из пьезометров за исключением участков между пьезометрами 53—54 и 105—101.

Табл. 2. Сравнение коэффициентов фильтрации, полученных методом откачки  $k_{\phi}$  и методом тепловой волны  $k_f$

Номер створа	Участок створа	$k_{\phi}$ , $10^{-2}$ см/с	$k_f$ , $10^{-2}$ см/с
5	Водохранилище — 36а	1,2...1,7	1,2
5	36 а — 36 б	1,2...1,7	1,8
5	36 б — 36 в	1,2...1,7	1,4
5	36 а — 36 в	1,2...1,7	1,4
8	Водохранилище — 53	1,2...1,7	1,2
8	53 — 54	1,2...1,7	3,2
8	54 — 55	1,2...1,7	2,4
12	99 — 100	1,2...1,7	1,7
12	100 — 105	1,2...1,7	1,6
12	105 — 101	1,2...1,7	6,8

Укажем еще один способ получения формулы (9) на основе применения формулы (8), в которой фигурирует действительная скорость  $w$  движения воды в порах грунта. По результатам измерения времени  $\Delta t$  движения тепловой волны между пьезометрами, находящимися на расстоянии  $l$  друг от друга, скорость

$$w = l/\Delta t,$$

где  $l_d$  — действительный осредненный путь движения воды от пьезометра до пьезометра. Вследствие извилистости ходов фильтрации всегда  $l_d > l$ . Существуют различные подходы к вычислению  $l_d$  через  $l$  [3]. Логично допустить, что удлинение ходов обратно пропорционально пористости  $n$  грунта, тогда

$$l_d = l/n, \text{ а } w = \frac{l}{n \Delta t}.$$

Подставив найденное значение  $w$  в формулу (8), получим выражение для определения коэффициента фильтрации  $k_f$  в (9).

**4. Оценка погрешности определения коэффициента фильтрации методом тепловой волны.** Определение значений коэффициентов фильтрации несвязных грунтов по (9) на основе температурных измерений обладает по сравнению с дру-

гими методами повышенной точностью. В самом деле, относительная погрешность  $\Delta_k$  определения коэффициента фильтрации связана с относительными погрешностями  $\Delta_l$ ,  $\Delta_\tau$ ,  $\Delta_h$  определения величин  $l$ ,  $\tau$ ,  $\Delta h$  следующей зависимостью

$$\Delta_k^2 = 4\Delta_l^2 + \Delta_\tau^2 + \Delta_h^2. \quad (10)$$

Определим примерные величины  $\Delta_l$ ,  $\Delta_\tau$ ,  $\Delta_h$ . Относительная погрешность  $\Delta_l$  определения расстояния  $l$  между пьезометрами равна отношению погрешности  $\Delta l$  определения расстояния к самой величине  $l$ . Можно допустить, что расстояние  $l$  между пьезометрами с учетом отклонения их от вертикали может быть измерено с погрешностью не более 0,5 м, тогда при  $l = 20$  м  $\Delta_l = \frac{0,5}{20} = 0,025$ . Погрешность определения

величины сдвига фаз тепловой волны  $\Delta\tau$  на основе анализа графиков К.А. Бобкова равна 5...10 сут при минимальной величине  $\tau = 60$  сут, тогда  $\Delta\tau = \frac{10}{60} = 0,17$ .

Погрешность определения разности  $\Delta h$  уровней воды в пьезометрах может быть принята равной 2...4 см, при величине разности  $\Delta h$  порядка 20 см относительная погрешность  $\Delta_h = \frac{4}{20} = 0,2$ . Тогда относительная погрешность  $\Delta_k$  определения коэффициен-

та фильтрации  $k$  по формуле (10) будет равняться:  $\Delta_k = 0,27 \approx 0,3$ . Как видим, даже при принятии достаточно больших погрешностей определения величин  $l$ ,  $\tau$ ,  $\Delta h$  погрешность определения коэффициента фильтрации  $k_i$  грунтов методом тепловой волны не превышает 30 %, что значительно меньше погрешностей определения коэффициентов фильтрации грунтов другими методами: налива, откачек, индикаторов и др. [3, 9]. Результаты обработки данных К.А. Бобкова [6] показывают, что величина погрешности определения коэффициента фильтрации  $k_i$  методом тепловой волны изменяется в пределах от 20 до 40 %.

**5. О применении результатов температурных измерений к оценке состояния грунтовых плотин из связных грунтов.** Связные грунты (супеси, суглинки, глины, моренные грунты) имеют коэффициенты фильтрации значительно меньше  $10^{-5} \dots 10^{-7}$  м/с, и поэтому тепловые волны в них распространяются в результате температуропроводности со скоростью  $u$  (формула (5)). Однако, как показывает график на рис. 3, эти волны быстро затухают в грунте уже на глубине  $x/l > 0,7$ , амплитуда тепловой волны составляет менее 1 % от амплитуды тепловой волны на поверхности грунта. Поэтому температурные измерения следует проводить термометрами, расположенными на таком расстоянии от напорного откоса, которое гарантирует фиксацию тепловой волны с известной погрешностью.

Найдем это расстояние по формуле (4). Если погрешность термометра равна  $\Delta t$ , то им можно зафиксировать тепловую волну с амплитудой  $t'$  не меньше чем  $2\Delta t$ , т.е. примем  $t' = 2\Delta t$ . Тогда искомое расстояние  $x_i$  от поверхности откоса до термометра будет равно

$$x_i = \frac{\ln \left( \frac{2\Delta t}{t} \right)}{\sqrt{\frac{\pi}{a\tau_0}}}. \quad (11)$$



К.А. Бобков применял электротермометр с термистором сопротивления ММТ-4, который позволял измерить температуру с погрешностью  $0,5^{\circ}\text{C}$  [6]. Применяя такой термометр для контроля состояния плотины из связных грунтов, его следует располагать на расстоянии не более 7-8 м от напорного откоса, как видно из расчета по формуле (11) при принятии амплитуды  $t_m = 30^{\circ}\text{C}$ .

Такой термометр позволит контролировать плотность и водопроницаемость грунта, а результаты измерений амплитуды тепловой волны могут также служить для определения осредненного значения коэффициента теплопроводности грунта на участке от откоса до термометра. Сделать это можно путем подстановки известных значений величин  $t'$ ,  $t_m$  и  $x_t$  в формулу (4) и получить

$$\dot{a} = \frac{\pi}{\tau_0} \left[ \frac{x_t}{\ln\left(\frac{t'}{t_m}\right)} \right]^2, \quad (12)$$

или путем подстановки известных значений величин в формулу (5) и получить

$$a = \frac{\tau_0}{4\pi} \left( \frac{x_t}{\tau} \right)^2, \quad (13)$$

где  $\tau$  — время движения тепловой волны от откоса до термометра.

**6. О влиянии теплового режима грунтовых плотин на фильтрационный поток в них.** В результате движения тепловой волны происходит постоянное изменение температуры фильтрующейся воды в различных створах грунтовой плотины из несвязных грунтов, что приводит к возникновению нестационарности в режиме фильтрации даже при отсутствии изменений колебаний уровня воды в бьефах. На рис. 1 приведены значения температуры воды в пьезометрах створа 5, измеренные К.А. Бобковым летом (I.VIII.1963 г.) и зимой (I.I.1964 г.) на намывной плотине Волгоградского гидроузла. Так как на дне водохранилища температура воды меняется незначительно в пределах  $4...6^{\circ}\text{C}$ , то между фильтрующим потоком в теле грунтовой плотины и потоком в основании плотины происходит сложный тепловой обмен в результате естественной конвекции.

Так, летом теплота из прогретой верхней толщи водохранилища передается потоку в основании, повышая его температуру. В срединной части плотины, где температура потоков в плотине и в основании одинаковы, обмена теплотой не происходит. В низовой призме также должен происходить подогрев воды в основании за счет тепла фильтрующейся воды в плотине.

Зимой в верховой призме плотины происходит движение теплового потока из основания в фильтрационный поток в плотине, а в срединной части плотины и в ее низовой призме движение тепла идет из плотины в основание, т.е. от больших температур к меньшим.

Из приведенного анализа теплового обмена следует, что фильтрационный поток в грунтовых плотинах, возведенных из несвязных грунтов, всегда находится в нестационарном состоянии. Этот вывод следует из того факта, что коэффициент фильтрации грунтов значительно зависит от температуры воды. Известно [3], что коэффициент фильтрации  $k$  связан с характеристиками грунта и жидкости следующей зависимостью

$$k = \frac{Cg}{\nu}, \quad (14)$$



где  $C$  — коэффициент проницаемости пористой среды,  $\text{м}^2$ ;  $g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости фильтрующейся жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ , который, как известно существенно зависит от температуры жидкости. Так как коэффициент проницаемости  $C$  является константой для данного пористого тела, то коэффициент фильтрации связан с кинематическим коэффициентом вязкости при разных температурах следующим образом

$$k_1 \nu_1 = k_2 \nu_2 \text{ или } k_2 = k_1 \frac{\nu_1}{\nu_2}. \quad (15)$$

Так, например, если коэффициент фильтрации песка  $k_1 = 3 \times 10^{-4}$  м/с при температуре воды  $t_1 = 5$  °С, а ее кинематический коэффициент вязкости  $\nu_1 = 1,52 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, то при температуре воды  $t_2 = 20$  °С  $\nu_2 = 1,01 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, тогда коэффициент фильтрации песка при температуре воды 20 °С будет равен

$$k_2 = 3 \times 10^{-4} \frac{1,52 \cdot 10^{-6}}{1,01 \cdot 10^{-6}} = 4,5 \times 10^{-4} \text{ м/с,}$$

т.е. в полтора раза больше, чем при  $t_1 = 5$  °С. Изменение коэффициента фильтрации грунта при изменении температуры воды приводит к изменению скорости фильтрации, а соответственно и к изменению глубины фильтрационного потока и его градиентов.

Так, летом для рассматриваемой плотины Волгоградского гидроузла в верховой призме будет происходить опускание кривой депрессии, а в средней части, где температура воды ниже на 20 °С, будет наоборот происходить подъем кривой депрессии. Зимой этот процесс имеет противоположный характер, т.е. в верховой призме будет происходить подъем кривой депрессии. Следует заметить также, что этот процесс дополнительно усугубляется зимой увеличением проницаемости бетонных плит крепления за счет раскрытия швов, а летом соответствующим уменьшением проницаемости бетонных плит крепления верхового откоса.

Именно изменением коэффициента фильтрации несвязных грунтов при движении тепловой волны объясняются известные аномалии в изменении кривой депрессии, которые до сих пор объяснялись результатом инерционного влияния капиллярной каймы [10].

*Выводы.* 1. Анализ теплопередачи в грунтовых плотинах показал, что тепловые волны в них перемещаются со скоростью  $3 \dots 5 \times 10^{-7}$  м/с, поэтому при фильтрации воды в грунтах с коэффициентом фильтрации меньше  $2 \times 10^{-7}$  м/с тепловые волны распространяются в результате теплопроводности. В грунтах с коэффициентом фильтрации больше  $2 \times 10^{-7}$  м/с тепловые волны перемещаются вынужденной конвекцией, т.е. фильтрационным потоком.

2. Температурные наблюдения за фильтрацией на грунтовых плотинах из несвязных грунтов позволяют вычислить осредненные значения коэффициентов фильтрации грунтов (по формуле (9)) с погрешностью не более 20...40 %, что точнее, чем с использованием других натуральных методов (откачки, индикаторов и др.).

3. Температурные наблюдения за фильтрацией на грунтовых плотинах из связных грунтов позволяют контролировать плотность и водопроницаемость грунтов и количественно определять теплопроводность грунтов по (12) и (13).

4. Показано, что движение тепловой волны в несвязных грунтах приводит к тому, что фильтрационный поток не может находиться в стационарном состоянии. В результате этого в фильтрационном потоке возникают сложные вторичные течения воды, вызванные естественной конвекцией (градиентом температур), которые являются основной причиной известных аномалий в изменении кривых депрессий в грунтовых плотинах.

### Библиографический список

1. Биянов Г.Ф. Плотины на вечной мерзлоте. М. : Энергия, 1983.
2. Цитович Н.А., Ухова Н.В., Ухов С.Б. Прогноз температурной устойчивости плотин из местных материалов на вечномерзлых основаниях. Л. : Госстройиздат, 1972. 143 с.
3. Аравин В.И., Носова О.Н. Натурные исследования фильтрации. Теоретические основы. Л. : Энергия, 1969. 258 с.
4. Аравин В.И., Носова О.Н. Вопросы методики натуральных исследований фильтрации // Эксплуатация гидротехнических сооружений гидроэлектростанций. Обмен опытом. М. : Энергия, 1977. С. 107—112.
5. Ронжин И.С. Сопоставление результатов натуральных наблюдений за фильтрацией в гидросооружениях с проектными предположениями // Эксплуатация гидротехнических сооружений гидроэлектростанций. Обмен опытом. М. : Энергия, 1977. С. 112—119.
6. Бобков К.А. Об использовании температурных наблюдений при контроле за фильтрацией в земляных плотинах // Эксплуатация гидротехнических сооружений гидроэлектростанций. Обмен опытом. М. : Энергия, 1977. С. 120—124.
7. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М. : Высш. шк., 1967.
8. СНиП 2.02.04—88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Нормы проектирования. М. : Стройиздат, 1988. С. 32.
9. Оценка точности определения водопроницаемости горных пород / Н.И. Ильин, С.Н. Чернышев, Е.С. Дзекцер, В.С. Зильберг. М. : Наука, 1971. 150 с.
10. Носова О.Н., Терский В.П. О природе аномальных особенностей фильтрационного режима земляных сооружений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1978. Т. 125. С. 97—100.

*Поступила в редакцию в январе 2012 г.*

Об авторе: **Малаханов Вячеслав Васильевич** — кандидат технических наук, профессор кафедры гидротехнических сооружений, **ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет»**, Ярославское шоссе, 26, vvmalakhnov@mail.ru.

Для цитирования: *Малаханов В.В. Использование температурных пьезометрических наблюдений для мониторинга состояния грунтовых плотин // Вестник МГСУ. 2012. № 3. С. 79—89.*

**V.V. Malakhanov**

### USE OF PIEZOMETRIC TEMPERATURE MEASUREMENTS IN THE MONITORING OF EARTH FILL DAMS

This paper demonstrates how temperature measurements of the water filtered by earthfill dams can be used to determine the soil filtration ratio and to monitor the condition of earthfill dams.

The ground water temperature change is caused by the processes of heat conductivity and convection. The analysis of heat transfer within earthfill dams demonstrates that the speed of thermal waves varies between  $(4-6) \cdot 10^{-7}$  m/s. Therefore, whenever the water filtration ratio is under  $4 \cdot 10^{-7}$  m/s, propagation of thermal waves is driven by the heat conductivity. If the soil filtration ratio is below  $2 \cdot 10^{-5}$  m/s, thermal waves are caused by forced convection (the filtration flow).

Temperature measurements of the water filtered by earthfill dams composed of non-cohesive soils make it possible to calculate averaged soil filtration ratios with an error under 20—40 %. This result is more precise than the one generated through the application of other natural methods (pumping out, use of indicators, etc.).

Temperature measurements of the water filtered by earthfill dams composed of cohesive soils make it possible to control their density and water penetration capacity, and to identify their thermal conductivity.

This paper demonstrates that the relocation of a thermal wave within non-cohesive soils prevents the filtration flow from remaining in a steady-state condition. As a result, complex secondary water flows are generated within the filtration flow by means of natural convection (the temperature gradient). Secondary water flows in question represent the principal cause of well-known abnormalities of depression curves of earthfill dams.

**Key words:** piezometric measurements, earthfill dams, soil filtration ratio, monitoring of earthfill dams, thermal wave, non-cohesive soils.

## References

1. Biyanov G.F. *Plotiny na vechnoy merzloste* [Dams in Permafrost Conditions]. Moscow, Energia, 1983.
2. Tsitovich N.A., Ukhova N.V., Ukhov S.B. *Prognoz temperaturnoy ustoychivosti plotin iz mestnykh materialov na vechnomerzlykh osnovaniyakh* [Projected Temperature Stability of Dams Made of Local Materials and Installed onto Permafrost Beddings]. Leningrad, Gosstroyizdat, 1972, 143 p.
3. Aravin V.I., Nosova O.N. *Naturnye issledovaniya fil'tratsii. Teoreticheskie osnovy* [Field Observations of Filtration. Theory]. Leningrad, Energiya, 1969, 258 p.
4. Aravin V.I., Nosova O.N. *Voprosy metodiki naturnykh issledovaniy fil'tratsii. Eksploatatsiya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy gidroelektrostantsiy. Obmen opytom* [Methodology of Field Observations of Filtration. Operation of Hydraulic Engineering Structures of Hydroelectric Power Plants. Exchange of Experience]. Moscow, Energiya, 1977, pp. 107—112.
5. Ronzhin I.S. *Sopostavlenie rezul'tatov naturnykh nablyudeniy za fil'tratsiy v gid-rosooruzheniyakh s proektnymi predpolozheniyami. Eksploatatsiya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy gidroelektrostantsiy. Obmen opytom* [Comparison of Results of Field Observations of Filtration inside Hydraulic Structures with the Design Assumptions. Operation of Hydraulic Engineering Structures of Hydroelectric Power Plants. Exchange of Experience]. Moscow, Energiya, 1977, pp. 112—119.
6. Bobkov K.A. *Ob ispol'zovanii temperaturnykh nablyudeniy pri kontrole za fil'tratsiy v zemlyanykh plotinakh. Eksploatatsiya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy gidroelektrostantsiy. Obmen opytom* [About the Use of Temperature Measurements as Part of Filtration Control Inside Earth Dams. Operation of Hydraulic Engineering Structures of Hydroelectric Power Plants. Exchange of Experience]. Moscow, Energiya, 1977, pp. 120—124.
7. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of Thermal Conductivity]. Moscow, Vyssh. shk., 1967.
8. SNiP 2.02.04—88. *Osnovaniya i fundamenti na vechnomerzlykh gruntakh. Normy proektirovaniya* [Building Norms and Regulations 2.02.04—88. Beddings and Foundations in Permafrost Soils. Norms of Design]. Moscow, Stroyizdat, 1988, p. 32.
9. Il'in N.I., Chernyshev S.N., Dzekts'er E.S., Zil'berg V.S. *Otsenka tochnosti opredeleniya vodopronitsaemosti gornyykh porod* [Assessment of Accuracy of Identification of Water Permeability of the Rock]. Moscow, Nauka, 1971, 150 p.
10. Nosova O.N., Terskiy V.P. *O prirode anomal'nykh osobennostey fil'tratsionnogo rezhima zemlyanykh sooruzheniy*. [About Abnormalities of the Filtration Mode of Ear Dams]. News of VNIIG named after B.E. Vedenev, 1978, Volume 125, pp. 97—100.

About the author: **Malakhanov Vyacheslav Vasil'evich** — Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Hydraulic Engineering Structures, **Moscow State University of Civil Engineering (MSUCE)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russia; email address: vvmalakhanov@mail.ru.

For citation: Malakhanov V.V. *Ispol'zovanie temperaturnykh p"ezometricheskikh nablyudeniy dlya monitoringa sostoyaniya gruntovykh plotin* [Use of Piezometric Temperature Measurements in the Monitoring of Earthfill Dams]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering], 2012, no. 3, pp. 79—89.