

**МЕТОД ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ
ТЕМПЕРАТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ
В ИЗМЕРЕННЫЕ ПРЕВЫШЕНИЯ
МЕЖДУ ТРУБЧАТЫМИ ГЛУБИННЫМИ РЕПЕРАМИ
В УСЛОВИЯХ ОТКРЫТОГО
ГИДРОГЕОТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА**

Положение марки глубинного трубчатого репера относительно якоря, жестко зафиксированного в коренных породах, определяется его длиной $l[t(\tau)]$, зависящей от распределения температуры $t(\tau)$ вдоль разреза l на заданный момент времени τ . Превышения по секции $Rp1-Rp2$ (рис. 1) соответствуют разности отметок марок реперов на моменты τ_1 и τ_2 для прямого и τ_3, τ_4 обратного ходов. Если при этом

$$t(z, \tau_1) \neq t(z, \tau_4)$$

и

$$t(z, \tau_2) \neq t(z, \tau_3),$$

где

$$0 < z \leq l_0;$$

l_0 — длина репера при $t=0^\circ\text{C}$, то поправки

$$\delta l_{4,1} = l[t(\tau_4)] - l[t(\tau_1)],$$

$$\delta l_{3,2} = l[t(\tau_3)] - l[t(\tau_2)] \quad (1)$$

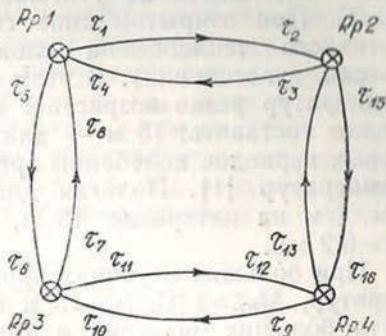


Рис. 1. Схема расположения глубинных реперов.

войдут полностью в разности превышений между прямым и обратным ходами по секции $Rp1-Rp2$ и окажут прямое влияние на оценку точности результатов нивелирования и отметки реперов. Термокомпенсированные реперы здесь не рассматриваются.

Произведя на момент привязки к реперу замеры температуры вдоль разреза с шагом Δl , вычислим соответствующую поправку по формуле

$$\delta l = \alpha \sum_{j=1}^n t_j \Delta l_j, \quad (2)$$

или

$$\delta l = \alpha \sum_{j=1}^n \Delta t_j \Delta l_j, \quad (3)$$

где α — линейный коэффициент термического расширения материала, из которого изготовлено тело репера; δl — в формуле (2) —

изменение длины репера относительно номинала l_0 при $t(z) = 0^\circ\text{C}$, а в формуле (3) — относительно $l_1 = l[t(\tau_1)]$; $t(\tau_1)$ — температуры вдоль разреза l на начало наблюдений τ_1 ; $\Delta t = t_j - t_{1j}$; n — число интервалов (слоев) от марки до якоря репера.

В отметки должны вводиться поправки, полученные по формуле (3).

В ряде случаев измерить $t(z)$ невозможно. Рассмотрим методику получения температурного разреза $t(z, \tau)$ аналитическим путем. При этом могут иметь место два существенно различных случая: 1) глубинный репер расположен на территории, принадлежащей закрытому типу гидротермического режима согласно классификации гидрогеологов [1], 2) открытому типу режима.

В первом случае верхний слой активного теплообмена сложен водонепроницаемыми породами (глины, суглинки). Суточные и годовые колебания температуры описываются гармоническим законом Фурье и имеют глубину проникновения 0,7 и 13,6 м соответственно. Здесь не учитываются вариации температуры менее $0,1^\circ\text{C}$. При открытом типе гидротермического режима слой активного теплообмена сложен водопроницаемыми породами (пески, супесчаники). В этом случае мощность слоев переменных температур резко возрастает и для реальных грунтовых условий может составить: 15 м — для суточных, 56 м и более — для годовых периодов колебаний при той же точности учета переменных температур [1]. Полагая для суточных колебаний $\Delta t_m = 1^\circ\text{C}$ в среднем на интервале 15 м, получим ориентировочную оценку $\delta l = 0,2$ мм.

При больших глубинах проникновения суточных вариаций температур, $\Delta t_m > 1^\circ\text{C}$, $l_0 > 15$ м поправки $\delta l_i^{\text{сут}}$, $\delta l_i^{\text{гол}}$ могут достигнуть больших значений и должны учитываться при выполнении прецизионного нивелирования.

Для стационарной модели верхнего слоя земли при условии, что температура земной поверхности меняется по гармоническому закону, скорость вертикальной фильтрации постоянна, теплофизические свойства грунтов не зависят от температуры, районы с открытым гидротермическим режимом, имеем [1]

$$t(z, \tau) = t_z + \sum_{i=1}^2 \Delta t_i e^{-kz} \cos \left(2\pi \frac{\tau}{\tau_i} - Bz + \varphi \right), \quad (4)$$

где t_z — среднегодовая температура грунта на глубине z ; Δt — амплитуда ее колебаний на поверхности земли; φ — фаза; $i=1$ соответствует колебаниям суточного периода, $i=2$ — годовым;

$$k = \left[\left(M^2 + \frac{N^4}{4} \right)^{1/2} + \frac{N^2}{2} \right]^{1/2} - N, \\ B = \left[\left(M^2 + \frac{N^4}{4} \right)^{1/2} - \frac{N^2}{2} \right]^{1/2}. \quad (5)$$

Здесь $M = \pi \frac{C\rho}{\lambda\tau_i}$; $N = \frac{VC_0\rho_0}{2\lambda}$; $(5')$

$C_{\text{ор0}}$ — объемная теплоемкость воды; $C_{\text{р}}$ — объемная теплоемкость, λ — коэффициент теплопроводности грунта.

Если определить фазу φ из условия

$$t(z, 0) = t(z), \text{ т. е. } \varphi - Bz = \pi/2, \quad (6)$$

то при $t(0, 0) = t_0$ получим $\varphi = \pi/2$ и на основании формулы (4) найдем

$$t(z, \tau) = t_z + \sum_{i=1}^2 \Delta t_i e^{-kz} \sin \left(2\pi \frac{\tau}{\tau_i} - Bz \right). \quad (7)$$

Это выражение — результат решения дифференциального уравнения Фурье—Кирхгофа, описывающего передачу тепла кондуктивным (молекулярным) путем и конвекцией, и рекомендовано [1] для вычисления $t(z)$ в условиях открытого гидрогеотермического режима.

Так как распределение температуры в стволе скважины отражает не только естественное геотемпературное поле за пределами скважины, но и результат влияния таких факторов, как естественная конвекция в стволе скважины, затрубная циркуляция, то, на наш взгляд, вариации δl на интервале $\tau_1 - \tau_n$ следует находить не по крайним значениям температурных разрезов $t(\tau_n)$ и $t(\tau_1)$ на моменты τ_n и τ_1 , а по среднему интегральному приращению температуры Δt_m на интервале времени $\tau_1 - \tau_n$, которое должно быть свободно от вариаций спорадического характера:

$$\delta l_j [t(\tau_n), t(\tau_1)] = \frac{\alpha}{\tau_n - \tau_1} \int_{z_{j-1}}^{z_j} \int_{\tau_1}^{\tau_n} t(z, \tau) dz d\tau; \quad (8)$$

$$\delta l = \sum_{j=1}^n \delta l_j. \quad (9)$$

Подставляя в (8) значения $t(z, \tau)$ согласно выражению (7) и выполняя интегрирование последовательно по τ и z , найдем

$$\begin{aligned} \delta l(\tau_1, \tau) &= \sum_{j=1}^n \delta l_j(\tau_1, \tau) = \frac{\alpha}{2\pi(\tau - \tau_1)} \sum_{i=1}^2 \Delta t_i \sum_{j=1}^n \rightarrow \\ &\rightarrow \left[\frac{B(\tau_1, \tau)}{k_j^2 + B_j^2} \{ e^{-(k_j z_j + \omega_j - 1)} (-k_j \cos B_j z_j + B_j \sin B_j z_j) - \right. \\ &- e^{-(k_j z_{j-1} + \omega_j - 1)} (-k_j \cos B_j z_{j-1} + B_j \sin B_j z_{j-1}) \} + \\ &+ \frac{A(\tau_1, \tau)}{k_j^2 + B_j^2} \{ e^{-(k_j z_j + \omega_j - 1)} (k_j \sin B_j z_j + B_j \cos B_j z_j) - \\ &\left. - e^{-(k_j z_{j-1} + \omega_j - 1)} (k_j \sin B_j z_{j-1} + B_j \cos B_j z_{j-1}) \} \right]. \quad (10) \end{aligned}$$

Здесь

$$A(\tau_1, \tau) = \left(\tau \sin 2\pi \frac{\tau}{\tau_i} - \tau_1 \sin 2\pi \frac{\tau}{\tau_i} \right),$$

$$B(\tau_1, \tau) = \left(\tau_1 \cos 2\pi \frac{\tau_1}{\tau_i} - \tau \cos 2\pi \frac{\tau}{\tau_i} \right); \quad (11)$$

$$\omega_{j-1} = k_1 z_1 + k_2 (z_2 - z_1) + \dots + k_{j-1} (z_{j-1} - z_{j-2}). \quad (12)$$

Выражение (12) получено следующим образом. Формула (7) справедлива для однородного слоя, $\Delta t = \Delta t_0$ — амплитуда колебаний температуры на внешней поверхности 1-го слоя за период τ_i . Чтобы найти $t(z)$ в j -м слое мощностью $z_j - z_{j-1}$ надо знать амплитуду Δt_{j-1} на нижней границе предыдущего слоя с номером $j-1$, т. е.

$$\Delta t_{j-1} = \Delta t_{j-2} e^{-\omega_{j-1} z_{j-1}}.$$

Последовательно исключая $\Delta t_{j-2}, \Delta t_{j-3}, \dots$, найдем

$$\Delta t_{j-1} = \Delta t_0 e^{-\omega_{j-1}}. \quad (13)$$

Отсюда

$$\Delta t_j = \Delta t_0 e^{-k_j z_j - \omega_{j-1}}, \quad (14)$$

которое использовано в формулах (7) и (8).

Параметры k_j, B_j вычисляем по физико-механическим и теплофизическим характеристикам грунтов. Для этого при бурении скважины под репер надо определить глубины z_j границ раздела слоев, их минералогический состав, объемную плотность ρ_{sj} вещественного состава грунтов, относительную влажность ω_j , пористость n_j , коэффициенты фильтрации $k_{\phi, j}$. Эти величины замеряем в обязательном порядке при буровых работах с отбором керна [2].

Коэффициенты теплопроводности λ и объемные теплоемкости C_p рекомендуется (1) вычислять по формулам:

$$\lambda(\bar{\omega}, \rho) = \bar{H} \lg \bar{\omega} + Q; \quad (15)$$

$$C_p(\bar{\omega}, \rho) = (C_c + C_b \bar{\omega}) \rho_c, \quad (16)$$

где параметры \bar{H}, Q выбираются из табл. 4 в работе [1] по аргументу ρ_c ; C_c, C_b — удельные теплоемкости сухой породы и воды — из справочника физических констант горных пород.

Амплитуду Δt_0 колебаний температуры суточного или годового периодов определяем по замерам ее с заранее назначенным шагом, скорости V вертикальной фильтрации воды — по замерам уровней H грунтовых вод в скважинах либо специальным методом [3]:

$$V = k_{\phi} \frac{H_2 - H_1}{nS} = k_{\phi} \frac{I}{n}, \quad (17)$$

где S — расстояние между замерами H_1, H_2 , n — пористость грунта; I — гидравлический градиент.

При $I=1$ получим наибольший вклад Δt в изменение длины репера на интервале наблюдений на протяжении суток.

Для сезонных $\delta l(t)$ скорости V представим суммой двух компонентов

$$V = V_1 + V_2, \quad (18)$$

где V_1 — вычисляется по формуле (16);

$$V_2 = \frac{\bar{Q} \cdot 10^{-3}}{\tau_2 n}; \quad (19)$$

\bar{Q} — количество атмосферных осадков, мм/год [1].

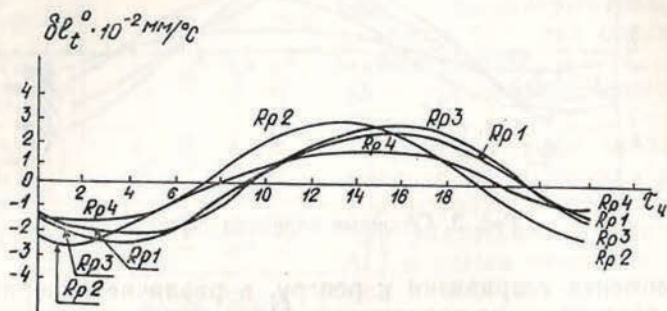


Рис. 2. Суточные вариации δl_t^0 сут.

Таким образом, используя данные инженерно-геологического разреза вдоль репера, можем по (10) заранее вычислить ожидаемые $\delta l_t^0(\tau)$ с $\Delta t_t^0 = 1^\circ\text{C}$ и представить их в виде таблиц или графиков с шагом, например, 1 ч для суточных и 1 мес для годовых $\delta l_t^0(\tau_j)$.

Определив Δt_t^0 по периодическим замерам температуры воздуха у головки репера на дату нивелирования и Δt_2^0 — по данным с ближайшей метеостанции, оценим наибольший вклад вариации геотемпературного поля на измеренное превышение в секции

$$\delta l_t(\tau_j, \tau_i) = \Delta t_1^0 \delta l^0 \text{сут}(\tau_j, \tau_i) + \Delta t_2^0 \delta l^0 \text{год}(\tau_j, \tau_i), \quad (20)$$

где $\delta l^0(\tau_j, t_i)$ — разности поправок $\delta l^0(\tau)$, выбираемых из таблиц либо графиков (рис. 2, 3). Если наблюдения относятся к разным датам, то для каждой из них должна быть определена соответствующая амплитуда Δt_1^0 .

На рис. 2 и 3 показаны графики хода $\delta l^0 \text{сут}(\tau)$ и $\delta l^0 \text{год}(\tau)$, вычисленные относительно начала суток и начала года соответственно для системы четырех глубинных реперов. Реперы расположены (см. рис. 1) на расстоянии 0,6...0,9 км друг от друга, представляют собой металлическую трубу длиной 32...34 м, забуренную в базальты на глубину до 1 м. Снаружи находится обсадная труба, сверху — термоизоляционный короб, оформленный согласно действующим наставлениям по закладке реперов. Инженерно-геологический разрез — пачка водопроницаемых песчаных слоев раз-

личной крупности, ниже — мел плотный и трещиноватый. Коэффициенты фильтрации пород от 0,03 м/сут (мел плотный) до 28,9 м/сут (песок крупнозернистый, водонасыщенный).

Наиболее существенное различие в строении грунтов по разрезам $Rp3$ и $Rp4$ — суммарная мощность песчаных отложений варьирует от 15 до 22 м.

Ход кривых на рис. 2 и 3 указывает на зависимость поправок

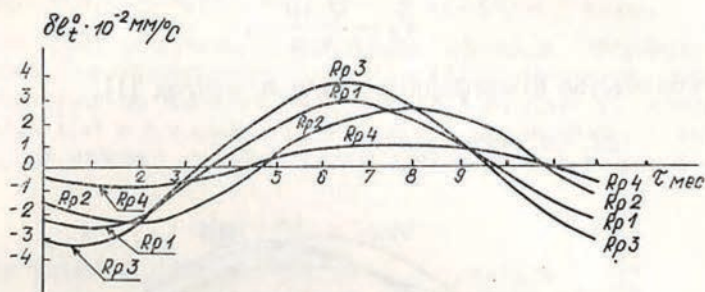


Рис. 3. Сезонные вариации δl_i^0 год.

δl_i^0 от момента τ привязки к реперу, а различие их ординат для разных реперов — на зависимость δl_i^0 от инженерно-геологического разреза вдоль тела репера. Поэтому «мгновенная» передача превышений между реперами не исключает поправку за вариацию температуры. Например, сезонные δl_i^0 наибольшие по секции $Rp3$ — $Rp4$ в июльском цикле наблюдений и минимальны в марте и октябре, по секции $Rp1$ — $Rp2$ — наибольшие в апреле-мае, наименьшие в августе, по секции $Rp2$ — $Rp4$ — наибольшие в августе и феврале, наименьшие в мае и ноябре и т. д. Суточные δl_n имеют наибольшие вариации, если ход начинается рано утром и заканчивается после полудня, зависимость от свойств инженерно-геологических разрезов здесь проявляется в меньшей мере.

В таблице приведены измеренные превышения по секциям нивелирования I класса и поправки δl_i по ходам.

Сравнивая разности превышений из прямого и обратного ходов (графы 8 и 9), видим, что учет $\delta l^{сут}$ приводит к их уменьшению по абсолютной величине и, следовательно, к уменьшению случайной компоненты при оценке точности нивелирования I класса [4].

Поправки $\delta l^{сут}$ вычисляли по формуле

$$\delta l_{i_n}^{сут}(\tau_j, \tau_i) = \Delta l_i^0 [\delta l^0(\tau_j) - \delta l^0(\tau_i)], \quad (21)$$

где $\tau_j < \tau_i$.

В результате наблюдения по секциям оказались приведенными к младшему моменту τ .

Для замыкания полигона (см. рис. 1) по времени требуется ввести поправки за приведение к единой дате

$$\delta l_{Rp}^{сут}(\tau_j, \tau_i) = \Delta l_1^0(\tau_j) \delta l^0^{сут}(\tau_j) - \Delta l_1^0(\tau_i) \delta l^0^{сут}(\tau_i). \quad (22)$$

Поправки $\delta l_{\text{сут}}$, $\delta l_{\text{год}}$ в превышения по сечениям и отметки реперов

Секция	Ход „прямо“			Ход „обратно“			Уравненные отметки							
	$h_{\text{изм.}}$, мм	\overline{t} , дата, часы, мин	Δl_1° , мм	$h_{\text{изм.}}$, мм	\overline{t} , дата, часы, мин	Δl_1° , мм	Δh , мм	Δh , $\delta l_{\text{сут}}$	мл. за прив. на сд. дату	мл. макс.	номер Rp	без учета $\delta l_{\text{сут}}$, мм	с учетом $\delta l_{\text{сут}}$ (4), (7), (10), мм	с учетом $\delta l_{\text{год}}$, (11) мм
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1														
Rp1—Rp3	149,20	9,04 9 ³⁵ —13 ⁴⁰	2,1 —0,05	— 148,10	10,04 17 ³⁰ —14 ¹⁵	2,1 —0,02	1,10	1,03	—0,01	—0,20	1	0,00	0,00	0,00
Rp3—Rp4	1494,90	7,04 9 ¹⁰ —11 ³⁵	2,0 —0,03	1492,90	7,04 18 ¹⁵ —16 ³⁰	2,0 —0,01	2,00	1,96	0,00	0,55	2	4236,45	4236,56	4236,63
Rp4—Rp2	2594,80	8,04 10 ³⁵ —5 ⁰⁰	2,0 0,01	2595,60	8,04 16 ³⁰ —18 ⁰⁰	2,0 0,01	0,80	0,78	0,08	—0,28	3	148,22	148,18	147,98
Rp2—Rp1	4235,00	5,04 18 ¹⁰ —9 ³⁵	6,2 —0,15	4247,00	5,04 16 ⁰⁰ —19 ³⁵	6,2 0,01	2,00	1,86	—0,07	—0,07	4	1641,68	1641,83	1642,04

Отличие $\delta l_{Rp}^{\text{сут}}$ от $\delta l_{h}^{\text{сут}}$ в том, что первая величина относится к отметке репера, а вторая — к превышению по секции.

В графах 13 и 14 показаны уравненные отметки реперов без учета $\delta l_{\text{сут}}$ и с учетом $\delta l_{h}^{\text{сут}}$, $\delta l_{Rp}^{\text{сут}}$. С целью оценки влияния δl в превышения и отметки реперов между циклами в графе 11 приведены наибольшие для данных инженерно-геологических разрезов $\delta l_{\text{год}}$ при среднегодовой амплитуде $\Delta t_{\frac{0}{2}} = 10^{\circ}\text{C}$, в графе 15 — уравненные отметки реперов.

Поправки δl оказались на пределе точности измерений нивелирования I класса. Однако при увеличении амплитуд $\Delta t_{\frac{0}{2}}$ и $\Delta t_{\frac{0}{2}}$, а также изменении параметров инженерно-геологического разреза величины δl могут заметно возрасти.

Для получения фактических δl надо произвести замеры $t(z)$ вдоль тела репера на моменты привязки, воспользоваться формулой (3) и взять соответствующие разности.

Предложенный алгоритм (10) рекомендуется для предварительной оценки величин поправок в отметки трубчатых реперов за вариацию поля геотемператур в зависимости от теплофизических свойств инженерно-геологического разреза в условиях открытого гидрогеотермического режима. Так как при вычислении $\delta l_{\text{сут}}$ гидравлические градиенты полагаются равными единице, то найденные $\delta l_{\text{сут}}$ являются наибольшими.

Полученные результаты служат основой для принятия решения о целесообразности учета поправок за температурные неоднородности в отметки реперов в

зависимости от требуемой точности работ. Если поправки существенны, то надо организовать замеры $l(z)$ и воспользоваться соотношением типа (3) либо перейти к глубинным реперам с термокомпенсаторами или другим их системам [4].

1. Геотермические методы исследований в гидрогеологии / Под ред. М. Фролова. М., 1979. 2. Инструкция по инженерным изысканиям для промышленного строительства. СН 225—79. М., 1979. 3. *Седенко М. П.* Инженерная геология и гидрогеология. М., 1983. 4. Справочное руководство по инженерно-геодезическим работам / Под ред. В. Д. Большакова и Г. П. Левчука. М., 1980.

Статья поступила в редколлегию 23. 04. 86