

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ О СЕЗОННЫХ КОЛЕБАНИЯХ ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКОГО НАПОРА НА ЗЕМЛЯНЫХ СООРУЖЕНИЯХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ

Анисимов К. И., Осадчий В. С., Осадчий С. С., Осадчая Н. И.,
Зедгенидзе В. А. (Одесская государственная академия строительства
и архитектуры, г. Одесса)

Произведено исследование природы сезонных колебаний депрессионной кривой в грунтовых ГТС и показана возможность по их величине определять скорость фильтрационного потока.

Вопросы безопасности грунтовых гидротехнических сооружений во многом зависят от своевременности и объема информации, поступающей от проведения натурных наблюдений, а также ее интерпретации. В значительной мере это относится к проблемам фильтрации в теле сооружения, основании и береговых примыканиях.

Анализ повреждений и разрушений плотин позволяет сделать вывод, что третьей, по числу аварий, причиной является нарушение фильтрационной прочности либо чрезмерные потери воды через грунтовые сооружения (после перелива через гребень воды и потери устойчивости или прочности сооружения либо основания) [1].

Одним из наиболее оперативных и достоверных источников информации о фильтрационных процессах является термический контроль, основанный на измерениях температуры фильтрационного потока на границах питания, разгрузки, наблюдательных скважин и т.п. Сезонные периодические изменения температуры в водоемах влекут за собой колебания температуры с таким же периодом, но с затухающей амплитудой по мере удаления от границ питания в фильтрационном потоке. Зачастую даже одноразовое такое измерение дает довольно ясную картину фильтрационной неоднородности, что значительно сужает зону поисков и исследования. В частности, на начальном этапе работы по исследованию фильтрации на левобережном примыкании плотины Днестровской ГЭС в результате термоизмерений фильтрационного потока, авторами были выявлены сосредоточенные ходы

фильтрации через инъекционную завесу примыкания (рис.1). Количество определить скорость фильтрации можно лишь в результате длительных (не менее 6-8 месяцев) измерений, в результате которых определяется амплитуда температурных колебаний по линиям тока, а также время и скорость прохождения экстремумов температуры.

Из-за изменения температуры фильтрующей воды изменяется и ее вязкость, что приводит к изменению проницаемости материала сооружения.

Это обстоятельство приводит к сезонным изменениям положения депрессионной линии, что часто фиксируется при наблюдениях на грунтовых сооружениях, особенно намывных [2], с достаточно высокими коэффициентами фильтрации.

Очевидно, что при известных колебаниях уровня воды, в пьезометрах (эти изменения проводятся, как правило, на всех сооружениях) и изменении температуры воды в водохранилище, можно определить величину колебания температуры фильтрационного потока, т. к. эти явления находятся в причинно-следственной зависимости.

При рассмотрении этих процессов полагалось, что скорость фильтрации описывается законом Дарси:

$$U_x = -k_{\Phi} \frac{\Delta H}{\Delta x} \quad (1)$$

где U_x – скорость фильтрации;

$\Delta H/\Delta x$ – градиент фильтрации;

k_{Φ} – коэффициент фильтрации, определяемый в соответствии с формулой Хазена:

$$k_{\Phi} = k_0 + k_1 T(x, t) \quad (2)$$

где k_0 – коэффициент фильтрации при некоторой средней температуре T ;

k_1 – изменение коэффициента фильтрации, вызванное изменением температуры воды вдоль потока.

Изменение температуры воды, фильтрующей через сооружение, описывается уравнением [3]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

где $U_x \partial T / \partial x$ – конвективное изменение температуры жидкости вследствие перемещения ее вдоль потока;

$\partial T / \partial t$ – локальное изменение температуры воды во времени;

a^2 – коэффициент температуропроводности.

Решение уравнения отыскивается в виде:

$$T(x, t) = T_0 T(0) e^{\alpha x + \beta t}, \quad (4)$$

при граничных условиях $x = 0$, когда температура изменяется периодически по закону:

$$T(x, t) = T(0) e^{i\sigma t}, \quad (5)$$

Решение уравнения (2) принимает вид:

$$Q(x, t) = Q_0 + Q(0) \exp \left\{ \frac{U_x}{2a} \left[1 \pm \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 16 \frac{a^4 \sigma^2}{U_x^4}} + 1 \right)} \pm \right. \right. \\ \left. \left. \pm i \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 16 \frac{a^4 \sigma^2}{U_x^4}} - 1 \right)} - \sigma t \right] \right\}, \quad (6)$$

где $\sigma = 2\pi/\tau$,

где $\tau = 365$ суток – период изменения температуры, как правило, 1 год. Решение этого уравнения, в рамках поставленной задачи, получается весьма громоздким и неудобным для анализа. В связи с этим, рассматривалась расчетная схема, где распространение тепла происходит в подвижной системе координат, которая движется со скоростью фильтрации U_x

$$\frac{\partial T}{\partial x^2} = a^2 \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (7)$$

Граничные условия в зоне питания выглядят как

$$T(0, t) = T_0 + T_1 \cos \sigma t, \quad (8)$$

где T_0 – средняя температура на границе питания;

$T_1 \cos \sigma_t$ – сезонные отклонения температуры от средней. Решение получаем в виде

$$T(x, t) = T_0 + T_1 e^{-kx_b} \cos(\sigma_t - kx_b), \quad (9)$$

где $k = \sqrt{\frac{\sigma}{2a^2}}$.

Коэффициент фильтрации с учетом уравнения (2) можно выразить следующим образом:

$$k_\Phi = k_0 + k_1 e^{-kx_b} \cos(\sigma_t - kx_b). \quad (10)$$

Подставляя значение k_Φ в уравнение (1) получаем:

$$U_x = \left[k_0 + k_1 e^{-kx_b} \cos(\sigma_t - kx_b) \right] \frac{dH}{dx}. \quad (11)$$

Фильтрационный расход можно определить как:

$$q_x = \left[k_0 + k_1 e^{-kx_b} \cos(\sigma_t - kx_b) \right] H \frac{dH}{dx}. \quad (12)$$

Решая уравнение (12), получаем:

$$H = H_1 \sqrt{1 - \left(1 - \frac{H_2^2}{H_1^2} \right) \frac{x}{L} \left[\frac{k_1 T_1}{k_0} e^{-kx_b} \cos(\sigma_t - kx_b) \right]}, \quad (13)$$

где H_1 – глубина потока на границе питания;

H_2 – глубина потока на границе разгрузки;

L – длина пути фильтрации.

Для напорного режима решение выглядит следующим образом:

$$H = H_1 - (H_1 - H_2) \frac{x}{L} \left[1 + \frac{0,043 T_1}{1 + 0,043 T_0} e^{-kx_b} \cos(\sigma_t - kx_b) \right]. \quad (14)$$

При выводе полученных выражений учитывалось то, что скорость теплового фронта равна скорости теплоносителя плюс скорость тепловой волны, т. е.:

$$U_t = U_\Phi + C_b.$$

Для проверки полученных решений был проведен опыт в приборе Дарси. В процессе эксперимента в прибор подавалась попеременно холодная и теплая вода; при этом контролировались изменения температуры по длине прибора, пьезометрических напоров, а так же расходов воды.

При различных условиях в эксперименте, скорость распространения температурного фронта несколько опережала скорость фильтрации:

$$\begin{aligned} 1. U_1 &= 0,0127 \text{ см/сек}; & 2. U_1 &= 0,0190 \text{ см/сек}; \\ U_2 &= 0,0120 \text{ см/сек}; & U_1 &= 0,0182 \text{ см/сек}. \end{aligned}$$

В формулах (9) – (14) x_b есть путь, пройденный тепловой волной:

$$x_b = C_b t, \quad (15)$$

$$C_b = a\sqrt{2\sigma}.$$

За время t частица воды пройдет путь x со скоростью U_Φ :

$$kx_b = \sqrt{\frac{\sigma}{2a^2}} a \sqrt{2\sigma \frac{x}{U_\Phi}}. \quad (16)$$

С учетом этого получаем:

$$H = H_1 - (H_1 - H_2) \frac{x}{L} \left[1 + \frac{0,043T_1}{1 + 0,043T_0} e^{\frac{-2\pi x}{\tau U_\Phi}} \cos\left(\sigma_t - \frac{2\pi x}{\tau U_\Phi}\right) \right]. \quad (17)$$

При $(\sigma_t - kx_b) = 0, \pi, 2\pi$; косинус имеет значения $\pm 1,0$, а, следовательно, $H_{\max} - H_{\min}$ есть амплитуда колебаний депрессионной (пьезометрической) линии, вызванная изменением температуры.

При известной скорости фильтрации и колебаниях напора в эксперименте получена хорошая сходимость расчетных (по формуле 17) и экспериментальных (рис. 2) амплитуд.

Для натуральных условий (для плотин, насыпок сооружений, береговых примыканий) следует использовать формулу (13).

В качестве примера использования зависимости (13) предлагаются результаты работ на сухом доке судостроительного завода «Океан» (рис.3). Док облегченной конструкции за счет снятия противодавления посредством устройства дренажа.

В процессе работы возникла потребность оценить величину притока фильтрационных вод из лимана. Было определено, что фильтрация происходит по обратной засыпке с разгрузкой в последних секциях дока, где происходит смешивание вод лимана и вод подземных горизонтов. Колебания уровня воды в пьезометрах были обусловлены изменением температуры воды, т. к. уровень воды в лимане практически постоянен. Рассматривались два пьезометра по разные стороны дока – № 2 по южной стороне и № 7 – по северной. При среднегодовой температуре воды в лимане 13°C и амплитуде ее колебаний в 1989 году от 0°C до 30°C, амплитуда колебаний уровня в пьезометре № 2 составила 2,5 м, а в пьезометре № 7 – 0,55 м.

Для южной стороны дока, при скорости $U_{\phi} = 9,75$ м/сут, расчетные положения уровня $\nabla_{\max} = -3,56$ м и $\nabla_{\min} = -6,06$ м, тогда как в натуре эти показатели $\nabla_{\max} = -3,64$ м и $\nabla_{\min} = -5,96$ м,

Для северной стороны дока, где расположен пьезометр № 7, расчетные уровни составили $\nabla_{\max} = -4,27$ м и $\nabla_{\min} = -4,83$ м при скорости 2,35 м/сут; наблюдаемые в 1989 году уровни $\nabla_{\max} = -4,31$ м и $\nabla_{\min} = -4,85$ м

При известных площадях засыпки расход, поступающий из лимана, составлял 161 м³/час. Для проверки притока из лимана к дренажу использовался метод смешения на основании уравнения Рихмана [4]:

$$T_{\text{Д}} = \frac{C_1 m_1 t_1 + C_2 m_2 t_2}{C_1 m_1 + C_2 m_2},$$

где $T_{\text{Д}}$ – температура смеси вод в дренаже;

$C_1 m_1 t_1$ – теплоемкость, масса и температура воды в зоне разгрузки;

$C_2 m_2 t_2$ – то же, вод подземных горизонтов, смешивающихся с водами лимана в дренаже.

При $C_1 = C_2$, $t_1 = 15^\circ\text{C}$, $t_2 = 11,4^\circ\text{C}$ и $T_d = 13,8^\circ\text{C}$, приток оценивается в $146 \text{ м}^3/\text{час}$ (при суммарном притоке $420 \text{ м}^3/\text{час}$).

С помощью полученных зависимостей можно не только получать скорости фильтрации в грунтовых массивах, измеряя уровень в пьезометрах и температуру в водохранилище; но и анализировать изменения, произошедшие за годы эксплуатации, используя при этом материалы наблюдений прошлых лет, т. е. выявлять динамику фильтрационных процессов в грунтовых сооружениях.

Следует отметить, что полученные зависимости применимы для тех случаев, когда уровни бьефов постоянны (например, для гидроузлов с суточным регулированием или лиманов). При изменении уровней бьефов задача усложняется. Необходимо отделить температурные колебания в пьезометрах от колебаний иной природы.

Литература

1. Золотев Л. А., Иващенко И. Н. Безопасность гидротехнических сооружений. – Гидротехническое строительство. – 1991. – № 2.
2. Анисимов К. И. О причинах изменения фильтрационного режима земляных сооружений. – Гидротехническое строительство. – 1988. – № 9.
3. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1966.
4. Семихатов А. Н. Гидрогеология. – М.: Сельхозгиз, 1954.

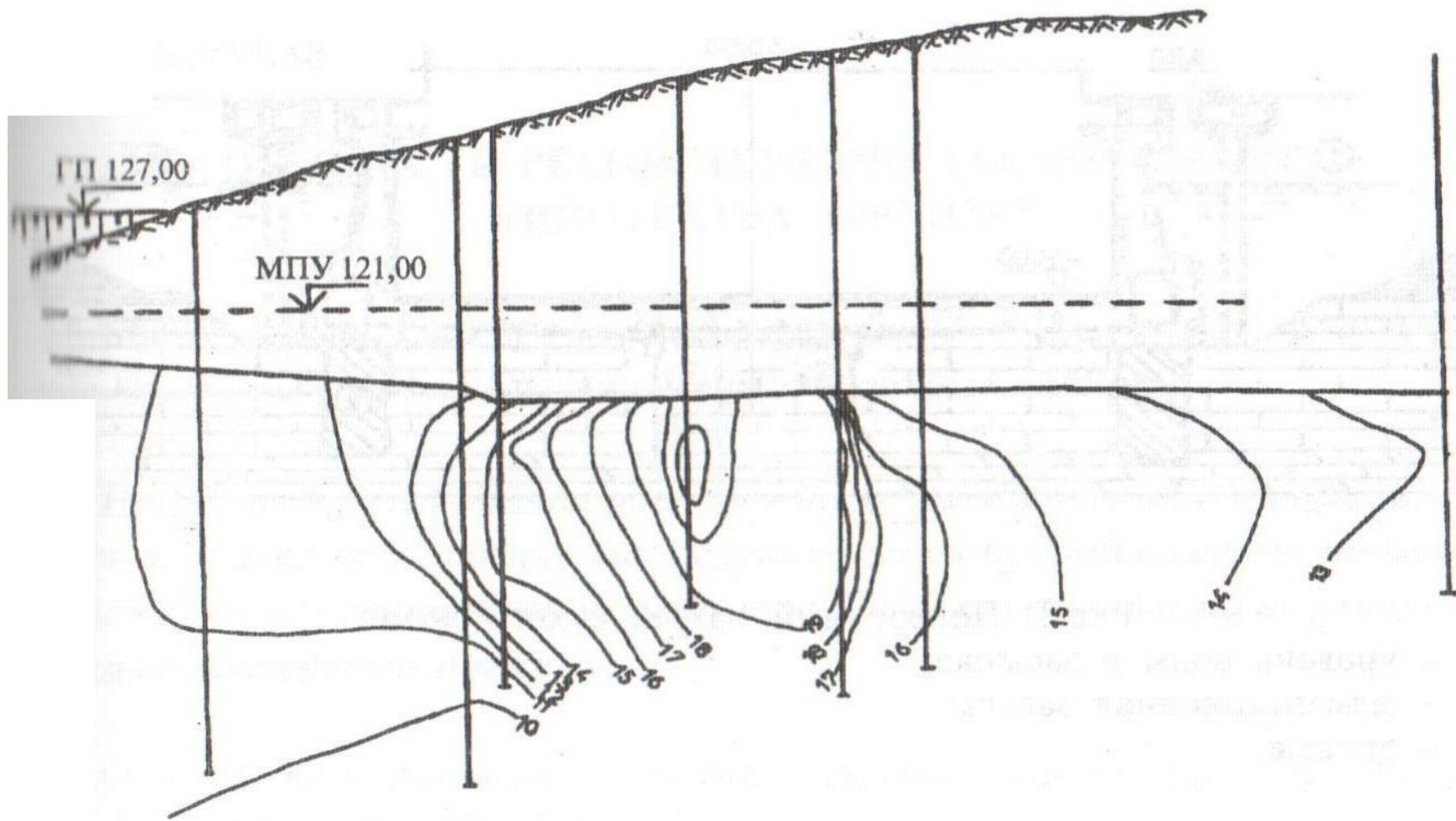


Рис.1. Изотермы фильтрованного потока по оси инъекционной завесы левобережного примыкания плотины Днестровской ГЭС

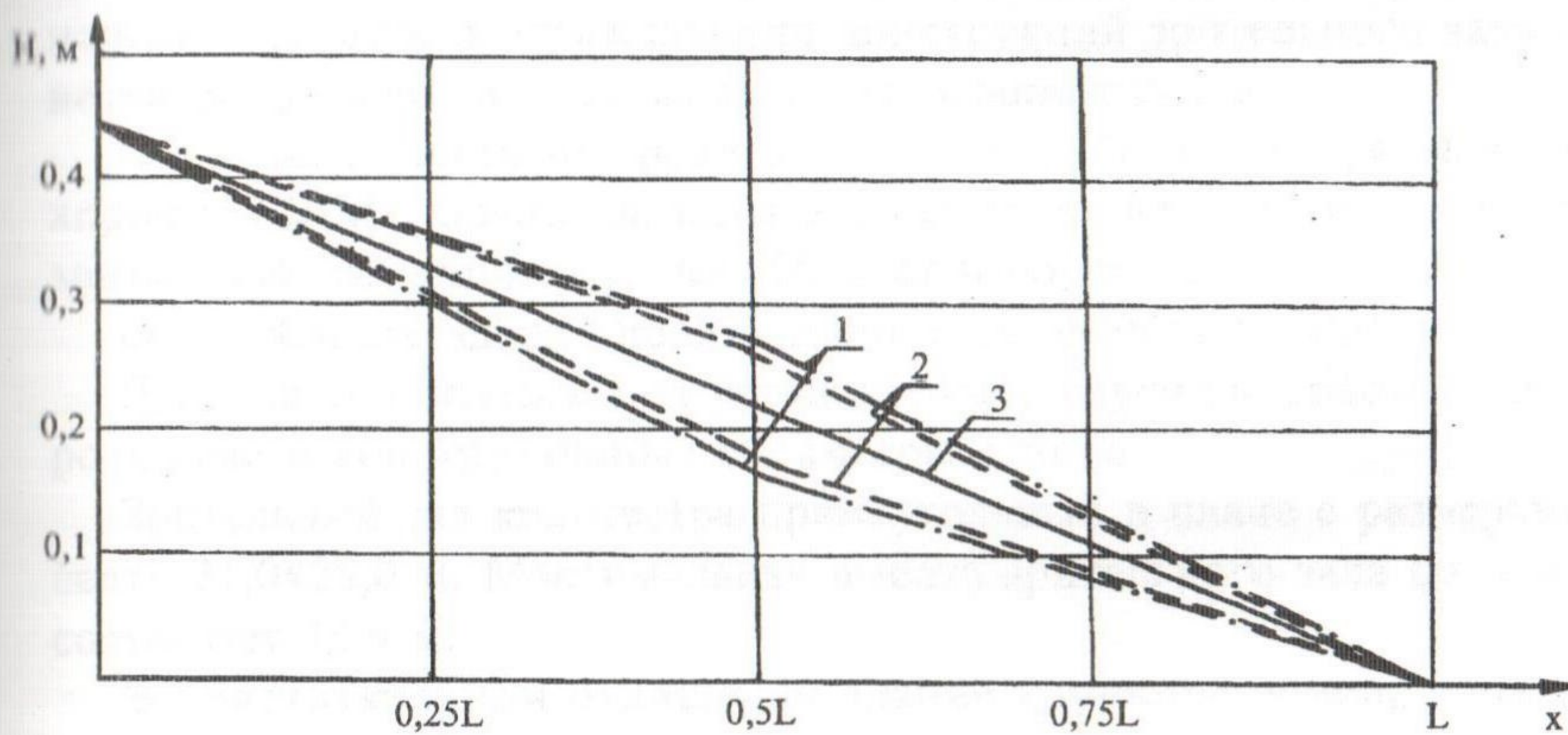


Рис.2. Экстримальные положения пьезометрической линии в приборе Дарси, при:

$T_0 = 16^\circ\text{C}$, $T_1 = 8^\circ\text{C}$, $U_\Phi = 0,014$ м/сек.

- 1 – положение линии в эксперименте;
- 2 – расчетное положение линии;
- 3 – положение линии при T_0 .

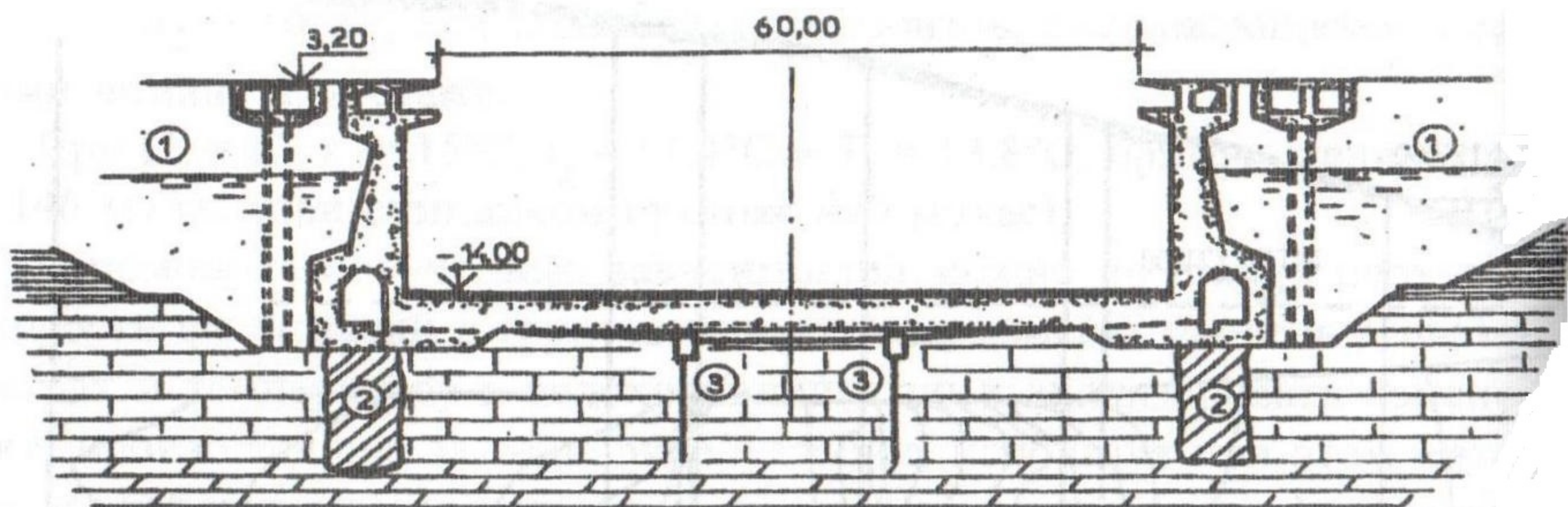


Рис.3. Поперечный разрез сухого дока.

- 1 — уровень воды в засыпке;
- 2 — цементационная завеса;
- 3 — дренаж.

