

05.23.07 Гидротехническое строительство

УДК 502/504:627.8

А. И. ГОЛОВАНОВ, Ю. И. СУХАРЕВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»
Институт природообустройства имени А. Н. Костякова

С. В. СОЛЬСКИЙ

Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт имени Б. Е. Веденеева»

МЕТОД РАСЧЕТА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ КУПОЛОВ ПОД ДНИЩЕМ БАСЕЙНОВ СУТОЧНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ГЭС

Предложен способ расчета фильтрационных куполов под днищем бассейнов суточного регулирования (БСР) деривационных гидроэлектростанций. Рассмотрены вопросы схематизации, граничные условия, алгоритм решения уравнения движения грунтовых вод, результаты расчетов с различными параметрами пласта и граничными условиями. Оценено вакуумирование дренажа в основании БСР. Дан анализ результатов расчетов.

Бассейны суточного регулирования деривационных ГЭС, фильтрационные купола, трехмерная математическая модель.

There is proposed a method of calculation of filtration cupolas under the basins bottom of daily regulation (BDR) of diversion hydropower plants. There are considered questions of schematization, boundary conditions, algorithm of equation solution of ground water movement, results of calculations with different parameters of layer and boundary conditions. Drainage vacuumizing is assessed in the basis of BDR. There is given an analysis of calculations results.

Basins of daily regulation of diversion HPP, filtration cupolas, three-dimensional mathematical model.

Для разработки диагностических устройств с целью локализации трещин в днищах бассейнов суточного регулирования (БСР) на деривационных гидроэлектростанциях необходимо знать параметры фильтрационных куполов под днищем БСР. Эта фильтрационная задача затруднительна из-за сложной конфигурации области фильтрации, явно выраженной многомерности потока и наличия зоны неполного водонасыщения. Аналитического решения такая задача не имеет, но современные методы описания фильтрационных потоков позволяют это сделать, применив математическое моделирование.

Условия моделирования были следующие: размеры бассейна суточного регулирования в плане – 20...50 м², днище мощностью 0,3...0,5 м из монолитного

железобетона и уложенного по слою геотекстиля на песчаной подушке. Нижний слой – щебень, примерно такой же мощности, выполняющий роль пластового дренажа для снятия фильтрационного напора и взвешивающих сил, которые при переменном и быстро изменяющемся уровне воды в бассейне могут вызвать нежелательные знакопеременные нагрузки, приводящие к образованию и развитию трещин в теле днища. Для ликвидации этого инфильтрационные воды должны отводиться дренажем, который с целью повышения его эффективности требует вакуумирования. Размеры этих трещин могут составлять несколько миллиметров.

Помимо этого возможно нарушение температурно-деформационных швов и порывы гидроизоляции, образующие свищи

и инфильтрацию в дренажную подушку. Размеры таких отверстий могут измеряться сантиметрами. Авторы считают, что таких источников инфильтрации, а следовательно, фильтрационных куполов, может быть несколько на один бассейн, они могут интерферировать, взаимодействуя друг с другом.

В связи с этим область фильтрации можно представить в виде пласта-бочки, приходящейся на одно отверстие, расположенное в центре. Пласт имеет изолированную боковую поверхность, что позволяет учесть интерференцию куполов. Верхней поверхностью пласта является днище бассейна суточного регулирования, нижней – непроницаемый или слабопроницаемый слой грунта основания, на котором лежат песчаная и щебеночная прослойки. Движение в таком пласте будет явно трехмерным, но задача упрощается, если движение представить радиально осевым. Фильтрационное тело принято многослойным с существенным отличием водно-физических свойств слоев.

На верхней поверхности расчетной схемы необходимо задать расположение отверстия и рассмотреть для общности два случая: когда в отверстие поступает поток воды с заданной интенсивностью; когда над отверстием формируется постоянный напор воды. В модели предусмотрена изменчивость во времени этого напора. На остальной площади, перекрытой фундаментной плитой, отсутствуют как атмосферные осадки, так и испарение (конденсацией влаги пренебрегаем).

Нижняя граница может быть представлена в двух вариантах: уровень грунтовых вод (УГВ) в дренируемой толще постоянный или переменный, когда происходит заполнение водой дренируемой толщи (в этом случае нет оттока фильтрации). Первое условие реализуется, когда в дренажной системе поддерживается постоянный напор, который с помощью сифона может образовывать некоторый регулируемый вакуум.

В значительной части фильтрационного тела движение воды будет происходить при неполном влагонасыщении, что требует учета капиллярных сил. Действующий напор надо представлять в следующем виде [1]:

$$H = -x + \psi,$$

где H – действующий напор (отсчет – от

поверхности дна и оси x , направленной вниз), m ; x – гравитационная составляющая напора, m ; ψ – напор, эквивалентный каркасно-капиллярному давлению в зоне неполного насыщения ($\psi \leq 0$) и эквивалентный гидростатическому давлению в зоне полного насыщения, m .

Такая обобщенная трактовка ψ позволяет описывать передвижение влаги в слое, включающем в общем случае изменяющийся в нем уровень грунтовых вод, а также зоны полного и неполного влагонасыщения пористой среды. Для зоны неполного влагонасыщения нужно иметь зависимость между влажностью ω и ψ , которую называют основной гидрофизической характеристикой пористой среды (ОГХ). Она может быть определена по данным полевых экспериментов, например, при одновременных измерениях влажности и напора пористой среды с помощью тензиометров. Авторами эта зависимость принята в следующем виде [2]:

$$\omega = \frac{\omega - \omega_m}{m - \omega_m} = \exp \left[- \left(\frac{|\psi|}{\nu h_k} \right)^n \right],$$

где h_k – максимальная высота капиллярного поднятия, m ; ω_m – максимальная гигроскопичность, m^3/m^3 ; m – влажность при полном заполнении пор, численно равная пористости, m^3/m^3 ; ν и n – эмпирические безразмерные коэффициенты, подбираемые так, чтобы наилучшим видом описать экспериментально определенную ОГХ (в наших расчетах приняты $\nu = 1$ и $n = 1$).

Вместо коэффициента фильтрации используется величина коэффициента влагопроводности. При изменении влажности в максимально широком диапазоне – от полного насыщения до максимальной гигроскопичности – эта зависимость принята в виде, несколько отличающемся от известной зависимости С. Ф. Аверьянова из-за расширения диапазона влажности грунта:

$$k = k_f \left(\frac{\omega - \omega_m}{m - \omega_m} \right)^5,$$

где k_f – коэффициент фильтрации, $m/сут$.

Вместо обычного коэффициента водоотдачи при неполном влагонасыщении применяют коэффициент влагоемкости $\sigma = \partial\omega / \partial H$, характеризующий изменение влажности грунта при небольшом изменении каркасно-капиллярного напора. Коэффициент влагоемкости определяется дифференцированием аппроксимации ОГХ. Для принятой зависимости

$$\sigma = n \frac{\omega - \omega_m}{v h_k} \ln \left[- \left(\frac{1}{\omega} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right],$$

а при $n = 1$ и $v = 1$

$$\sigma = \frac{\omega - \omega_m}{h_k}$$

(например, для песка при влажности $\omega = 0,15$; $\omega_m = 0,05$ и $h_k = 0,5$ м $\sigma = 0,2$ м⁻¹).

Естественно, что при $\psi > 0$ $\sigma = 0$, т. е. под уровнем грунтовых вод (при полном влагонасыщении) коэффициент влагоемкости равен нулю, а водоотдача проявляется при изменении влажности над уровнем грунтовых вод при их колебании. При влажности близкой к максимальной гигроскопичности коэффициент влагоемкости также стремится к нулю.

Запишем уравнение движения грунтовых вод в обеих зонах в случае радиально-осевой двумерной фильтрации, выраженное в полных напорах влаги, в конечно-разностной форме (неявная схема) для блока i, j :

$$\sigma_{i,j}^{n+1} \frac{H_{i,j}^{n+1} - H_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{H_{i,j-1}^{n+1} - H_{i,j}^n}{h_j R_{i,j-1}^B} - \frac{H_{i,j}^{n+1} - H_{i,j+1}^n}{h_j R_{i,j}^B} + \frac{H_{i,j-1}^{n+1} - H_{i,j}^n}{b_i R_{i-1,j}^r} - \frac{H_{i,j}^{n+1} - H_{i+1,j}^n}{b_i R_{i,j}^r} - e_{i,j}^n, \quad (1)$$

где $R_{i,j}^B$ – вертикальное сопротивление потоку влаги между центрами i, j и $i, j+1$ блоков, сут.

На моменты времени n и $n + 1$:

$$R_{i,j}^B = 0,5(h_j / K\omega_{i,j} + h_{j+1} / K\omega_{i,j+1}),$$

где $R_{i,j}^r$ – горизонтальное сопротивление потоку влаги между центрами i, j и $i, j+1$ блоков, сут/м:

$$R_{i,j}^r = \frac{1}{K\omega_{i,j}} \ln \left(\frac{r_i + 0,5b_i}{r_i} \right) + \frac{1}{K\omega_{i+1,j}} \ln \left(\frac{r_{i+1}}{r_i + 0,5b_i} \right),$$

где Δt – расчетный шаг по времени, сут.

Вся исследуемая толща была разбита на элементарные слои h_j ($1 \leq j \leq N_x$) с толщиной 0,05 м, при этом $h_0 = h_{N_x} = 0$. Число слоев – 21, включая и нулевой, т. е. $N_x = 21$. Рассматриваемый «пласт-бочка» разбивался вертикальными цилиндрами для образования столбцов и расчетных блоков. Ширина этих блоков (по радиусу) b_i ($1 \leq b_i \leq N_r - 1$) принималась переменной, а $b_0 = b_r = 0$. Число блоков в одном слое было равно 12, включая и нулевой, т. е. $N_r = 21$. Центр блока находился на расстоянии $r_i = r_{i-1} + (b_{i-1} + b_i) / 2$ от оси «пласта-бочки».

Задавшись площадью днища, приходящейся на одно отверстие, и заменив ее на равновеликий круг, получаем радиус

пласта-бочки. В примере площадь на одно отверстие принята равной 30 м², а радиус 3,09 м.

Определение напоров почвенной влаги $H_{i,j}^{n+1}$ с помощью системы алгебраических уравнений представляет собой громоздкую вычислительную задачу, так как сводится к нахождению порядка 250 неизвестных (при принятой разбивке на блоки) с малым шагом ввиду сильного возмущения потока. Следует также отметить существенную нелинейность этой системы уравнений, в которой емкостной коэффициент и проводимость существенно зависят от напоров почвенной влаги, следовательно, и от влажности почвы, что требует 3...7 итераций на каждом временном шаге. Поэтому алгоритм решения системы (1) должен быть наиболее эффективным. В настоящее время таковым является метод матричной прогонки, который введением вектора напоров по всем i -м столбцам для каждого слоя j позволяет понизить размерность задачи до одномерной [3]:

$U_j = |H_{1,j}^{n+1}; H_{2,j}^{n+1}; H_{3,j}^{n+1}; \dots; H_{N_r-1,j}^{n+1}|$ при этом $j = 0, 1, 2, 3 \dots N_x$.

С помощью этого вектора систему (1) уравнений запишем в матричном виде:

$$AA_j U_{j-1} - CC_j U_j + BB_j U_{j+1} = F_j,$$

где AA_j и BB_j – квадратные диагональные матрицы размером $(N_r - 1) \cdot (N_r - 1)$, учитывающие вертикальные потоки влаги между $i, j-1$ и i, j блоками и между i, j и $i, j+1$ блоками; CC_j – квадратная трехдиагональная матрица размером $(N_r - 1) \cdot (N_r - 1)$, учитывающая потоки влаги между $i-1, j$ и i, j блоками и между i, j и $i+1, j$ блоками, а также емкостной член; вектор F_j объединяет все свободные члены:

$$F_j = |e_{1,j}^n - \frac{Cw_{1,j}^{n+1}}{\Delta t} H_{1,j}^n; e_{2,j}^n - \frac{Cw_{2,j}^{n+1}}{\Delta t} H_{2,j}^n; e_{3,j}^n - \frac{Cw_{3,j}^{n+1}}{\Delta t} H_{3,j}^n; \dots; e_{N_r-1,j}^n - \frac{Cw_{N_r-1,j}^{n+1}}{\Delta t} H_{N_r-1,j}^n|.$$

Источники или стоки (если они имеются) на вертикальных границах или внутри области фильтрации учитываем при вычислении этого вектора.

Решение системы матричных уравнений находим в виде рекуррентной формулы:

$$U_j = PP_j \cdot U_{j+1} + QQ_j.$$

Для этого при прямой прогонке вычисляем матрицы прогоночных коэффициентов PP_j и прогоночные векторы-столбцы QQ_j :

$$PP_j = \| CC_j - AA_j \cdot PP_{j-1} \|^{-1} \cdot BB_j;$$

$$QQ_j = \| CC_j - AA_j \cdot PP_{j-1} \|^{-1} \cdot \| AA_j \cdot QQ_{j-1} - F_j \|.$$

В этих формулах $\| a_{ik} \|^{-1}$ обозначает

обращенную матрицу.

Матрицы PP_j квадратные, размером $(N_r - 1) \cdot (N_r - 1)$, их общее количество равно N_x , при принятой разбивке области фильтрации они содержат $12 \times 21 = 252$ элемента. Длина вектора-столбца QQ_j 21 элемент, всего таких векторов N_x .

При обратной прогонке вычисляем искомый вектор напоров почвенной влаги U_j на конец временного шага Δt .

Верхнее граничное условие учитываем, особым образом вычисляя первую матрицу прогоночных коэффициентов PP_0 и первый вектор-столбец QQ_0 . Так, если через верхнюю границу ($x = 0$) нет потока влаги, то $H_{i,0}^{n+1} = H_{i,1}^{n+1}$ при заданном напоре $H_{i,0}^{n+1} = H_0$. Элементы диагонали матрицы PP_0 равны $P_{ii} = 1$, а остальные – нулевые. Все элементы вектора-столбца QQ_0 равны нулю. При заданном потоке воды через поверхность грунта интенсивностью q м/сут диагональные элементы матрицы PP_0 равны $P_{ii} = 1$, а остальные – нулевые. Элементы вектора-столбца QQ_0 равны: $Q_i = -qR_{i,0}^B$.

Условия на нижней границе ($x = x_{N_x}$) реализуются при особом вычислении последнего вектора напоров U_{N_x} :

1) при отсутствии потока влаги через нижнюю границу (водоупор) $H_{i,N_x}^{n+1} = H_{i,N_x-1}^{n+1}$, поэтому напоры вычисляются по формуле $U_{N_x} = |H_{i,N_x}^{n+1}| = \|EE - PP_{N_x-1}\|^{-1} \cdot QQ_{N_x-1}$, где EE – квадратная диагональная единичная матрица, т. е. у которой элементы $E_{ii} = 1$;

2) при наличии гидравлического взаимодействия с пластами более глубокого залегания (напорное подпитывание) интенсивностью

$$d_i = k_0 \frac{h_p - h_{T_i}}{T_0},$$

где k_0 – коэффициент фильтрации отдельного слабопроницаемого пласта; T_0 – его мощность; h_p – отметка пьезометрического уровня в напорном пласте; h_{T_i} – уровень грунтовых вод в i -м столбце, считая от дна БСР,

напоры на нижней границе вычисляем по формуле

$$U_{N_x} = |H_{i,N_x}^{n+1}| = \|EE - PP_{N_x-1}\|^{-1} \cdot (QQ_{N_x-1} - dd_i),$$

где dd_i – вектор-столбец с элементами d_i ;

3) при заданной постоянной во времени глубине грунтовых вод h_r

$$U_{N_x} = |H_{i,N_x}^{n+1}| = -h_r;$$

4) при очень глубоких грунтовых водах, не участвующих в круговороте почвенных вод,

$$U_{N_x} = |H_{i,N_x}^{n+1}| = \|1 - PP_{N_x-1}\|^{-1} \cdot (QQ_{N_x-1} - |0,5h_{N_x-1}|),$$

где $|0,5h_{N_x-1}|$ – вектор-столбец с одинаковыми элементами, равными $0,5h_{N_x-1}$.

Компьютерная программа фильтрационных расчетов написана на алгоритмическом языке Visual Basic, версия 6. Блок-схема обычная: ввод исходных данных, подготовка к расчету, решение системы уравнений, их анализ и формирование файлов результатов расчетов.

По разработанной математической модели выполнена серия расчетов с различными параметрами пласта и граничными условиями. В основании БСР исследовалась песчаная подушка мощностью 0,5 м со свойствами: пористость 0,35; максимальная гигроскопичность 0,05; коэффициент фильтрации 4 м/сут; максимальная высота капиллярного поднятия 0,6 м. Уложенная ниже пластовая дрена толщину 0,5 м из щебня имела следующие свойства: пористость 0,30; максимальная гигроскопичность 0,04; коэффициент фильтрации 40 м/сут; максимальная высота капиллярного поднятия 0,5 м.

Было принято, что днище бассейна имеет отверстие диаметром 20 мм. Площадь днища, приходящаяся на одно отверстие, равна 30 м². Поступление воды в отверстие определено по двум расчетным схемам: под действием напора в бассейне или при заданном расходе утечки. Слой щебня дренируется вакуумным дренажем, разряжение в дренажной трубе принято равным 0,5 м водного столба, т. е. напор в нем равен 1,5 м, считая от дна бассейна. Такая схема объясняется требованием эффективно дренировать основание бассейна для снятия взвешивающего гидростатического давления. Следует отметить, что если дренажная труба соединяется с атмосферой, то вода из не полностью влагонасыщенной песчано-щебенчатой подушки вытекать не будет, пока давление в ней не превысит или не станет равным атмосферному, а пористое пространство не будет полностью насыщено водой. При этом под днищем создается противодействие, особенно большое около отверстия, т. е. создаются условия для дальнейшего раскрытия температурно-деформационных швов.

Было важно сравнить результаты расчетов при разных схемах поступления воды в отверстия: под заданным напором или при заданном расходе утечки. Оказалось, что они практически мало отличаются.

Были оценены размеры куполов

растекания, а точнее, увлажнения, под отверстием, для чего использовалась конечная установившаяся матрица влажностей. Эпюры влажности в куполе увлажнения при напоре в отверстии 20 м показаны на рис. 1. На рисунке выделены песчаный и щебеночный слои, отражено действие вакуумного дренажа (малая влажность в слое щебня). Под отверстием формируется зона промачивания, которая не всегда достигает щебеночного слоя. О дальности промачивания можно судить по изоплете влажности 0,10 объема на подошве песчаного слоя (в данном примере около 1,8 м).

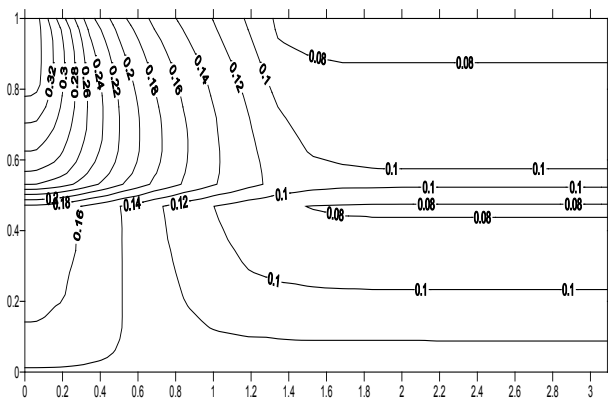


Рис. 1. Установившиеся эпюры влажности при напоре 20 м

Дальность промачивания, или радиус фильтрационного бугра существенно зависит от напора в отверстии (рис. 2). При редко расположенных отверстиях и при больших напорах радиус может достигать до двух метров, а при частом размещении они могут смыкаться. Распределение влажности песчаного слоя на его подошве показано на рис. 3.

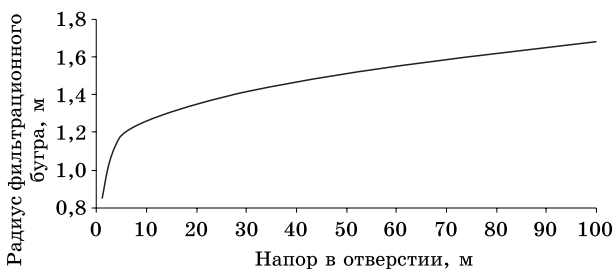


Рис. 2. Дальность увлажнения под отверстием в зависимости от напора в нем

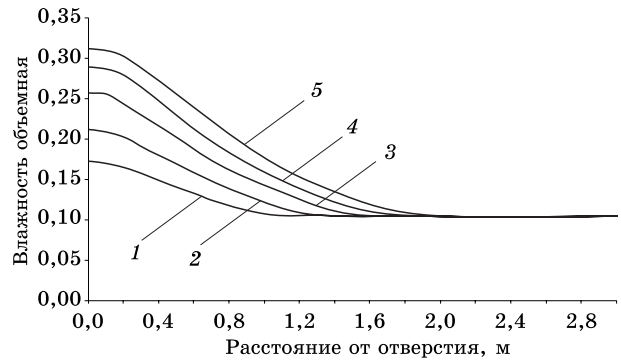


Рис. 3. Объемная влажность песчаного слоя на его подошве при разных напорах в отверстии: 1 – напор 1 м; 2 – напор 5 м; 3 – напор 20 м; 4 – напор 50 м; 5 – напор 100 м

Суточный слой впитывания, отнесенный к площади на одно отверстие, пропорционален напору в нем и при наших условиях колеблется от 1,5 до 150 мм/сут при напорах 1...100 м. Он больше зависит от водопроницаемости песчаной подушки, чем от гидравлического сопротивления самого отверстия.

Качественный анализ результатов расчета показывает, что предложенный способ расчета влияния отверстий в днище бассейнов суточного регулирования деривационных ГЭС достаточно подробно описывает размеры куполов увлажнения и может быть использован для разработки схемы размещения датчиков утечки воды через трещины.

1. Голованов А. И., Новиков О. С. Математическая модель переноса влаги и растворов солей в почвогрунтах на орошаемых землях: Труды МГМИ. – М.: МГМИ, 1974. – Т. 36. – С. 87–95.

2. Плюснин И. И., Голованов А. И. Мелиоративное почвоведение. – М.: Колос, 1983. – 318 с.

3. Голованов А. И., Сухарев Ю. И. Математическая модель влагопереноса в ландшафтных катенах: Природобустройство и рациональное природопользование – необходимые условия социально-экономического развития России: сб. науч. трудов. – М.: МГУП, 2005. – Ч. 2. – С. 3–11.

Материал поступил в редакцию 11.09.14.
Голованов Александр Иванович, доктор технических наук, профессор
 Тел. 8-916-341-35-51
 E-mail: a.i.golovanov@mail.ru
Сухарев Юрий Иванович, доктор

технических наук, профессор кафедры
«Мелиорация и рекультивация земель»
Тел. 8-916-611-80-23
E-mail: vodoem@mail.ru
Сольский Станислав Викторович,

доктор технических наук, заведующий
отделом «Основания, грунтовые и под-
земные сооружения»
Тел. 8-921-964-36-05
E-mail: solskiysv@vniig.ru

УДК 502/504:626/627

В. Н. АВЕРЬЯНОВ

ЗАО «Проектно-изыскательское научно-исследовательское бюро «ГИТЕСТ»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАБУХАЮЩЕЙ ГЛИНЫ ДЛЯ ВОЗВЕДЕНИЯ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЭКРАНОВ ГАЭС

Дана оценка возможности использования набухающих глин для возведения противοфильтрационных экранов ГАЭС. Выполненными исследованиями показано, что нарушение естественной структуры глины при строительстве экрана и устройство его пригрузки в виде защитного покрытия практически исключают набухание глины и увеличение ее водопроницаемости. Экран, возведенный из этих глин, характеризуется коэффициентом фильтрации $K_f = A \cdot 10^{-9}$ см/с, где $A = 1 \dots 10$.

Противοфильтрационный экран, возведение, набухающая глина, водопроницаемость, структура глины, коэффициент фильтрации, плотность грунта, влажность грунта.

The assessment of the possibility of using swelling clays for construction of watertight screens of PSP (pump storage plant) is given. The carried out researches have shown that breakage of the clay natural structure during construction of the screen and the way of its cantledging as a protective coating practically eliminate clay swelling and increase of its water tightness. The screen built of these clays is characterized by filtration coefficient $K_f = A \cdot 10^{-9}$ cm/s, where $A = 1 \dots 10$.

Watertight screen, construction, swelling clay, permeability, clay structure, filtration coefficient, soil density, soil humidity.

В состав основных сооружений гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС) обязательно входит верхний аккумулирующий водоем, в котором накапливается вода для выработки электроэнергии. Чтобы минимизировать фильтрационные потери воды, закаченной в водоем снизу, и исключить возможность ухудшения гидрогеологической обстановки в районе расположения ГАЭС, верхний аккумулирующий водоем экранируют.

При проектировании и строительстве противοфильтрационных экранов из глинистых грунтов для водоемов ГАЭС большое внимание уделяется оценке возможности изменения их водопроницаемости во время строительства и

эксплуатации за счет набухания глины в процессе ее водонасыщения.

Влияние набухания глинистого грунта экрана на водопроницаемость изучали на примере Днестровской ГАЭС. Исследовали набухание образцов неогеновой глины ненарушенной структуры при естественной влажности и образцов нарушенной структуры, сформированных уплотнением валовых проб глины до состояния, характеризующегося полутвердой консистенцией и коэффициентом водонасыщения 0,89...0,94, соответствующим требованиям технических условий на возведение экрана.

В естественной залежи тонкодисперсные неогеновые глины характери-