

## ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВЕННОГО РЕЖИМА ДРЕНИРУЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ УЧЕТА БАЛАНСА ВЛАГИ В ЗОНЕ АЭРАЦИИ

При относительно медленном понижении уровней грунтовых вод над депрессионной поверхностью потока всегда устанавливается зона переменного влагосодержания или капиллярной влагоемкости, обусловленная действием капиллярных сил [1]. Влагосодержание в зоне неполного насыщения, как правило, закономерно убывает от полного — на депрессионной поверхности грунтового потока  $W_{\Pi}$  до наименьшего (максимальной молекулярной)  $W_0$  (рис. 1). При выполнении водобалансовых и фильтрационных расчетов весьма актуальной является задача количественной оценки способности дренируемых грунтов вмещать или отдавать гравитационную влагу при изменении УГВ.

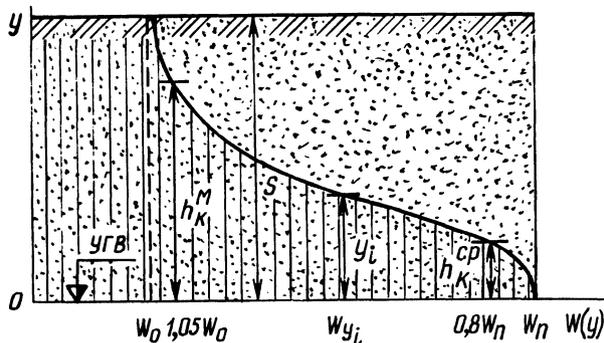


Рис. 1. Эпюра равновесного влагосодержания выше уровней грунтовых вод.

Рассмотрим случай, когда депрессионная поверхность фильтрационного потока отстоит от поверхности на глубину  $s$  (рис. 1). Тогда объем пор, свободных от гравитационной влаги (водовместимость грунта), можно определить из выражения

$$G(s) = w_{\Pi} s - \int_0^s w_y dy,$$

где  $G(s)$  — объем гравитационной влаги, дренированной с единицы площади при понижении УГВ на глубину  $s$ ;  $w_{\Pi} s$  — объем влаги, содержащейся в колонне

грунта высотой  $s$  при полном водонасыщении;  $\int_0^s w_y dy$  — объем пор грунта

выше поверхности грунтовых вод, заполненный капиллярно-подвешенной влагой;  $w_{\Pi}$  — полная влагоемкость (влагосодержание при полном насыщении);  $w_y$  — капиллярная влагоемкость.

В мелиоративной гидрогеологии и почвоведении при подсчете влагозапасов в зоне аэрации широко используется понятие коэффициента интегральной водоотдачи

$$\mu_u(s) = \frac{G(s)}{W_\Gamma} = \frac{W_\Pi s - \int_0^s W_y \cdot dy}{s}, \quad (1)$$

где  $W_\Gamma$  – объем грунта, из которого дренировала гравитационная влага.

Выражение (1) можно записать в виде

$$\mu_u(s) = W_\Pi - \frac{1}{s} \int_0^s W_y \cdot dy = W_\Pi - W_{cp}, \quad (2)$$

где  $W_{cp}$  – среднее влагосодержание в зоне капиллярной каймы при понижении УГВ на глубину  $s$  от поверхности.

При выполнении фильтрационных расчетов по формулам неустановившейся фильтрации следует располагать данными о коэффициенте дифференциальной (текущей) водоотдачи дренируемых грунтов, определяемом выражением

$$\mu_g(y) = \frac{dG(y)}{dy} = W_\Pi - W_y. \quad (3)$$

Для определения  $\mu_u(s)$  и  $\mu_g(s)$  необходимо располагать зависимостями, учитывающими изменение влагосодержания  $W_y$  в зоне неполного насыщения при снижении или подъеме УГВ.

Для описания кривой остаточного влагосодержания в настоящее время используется целый ряд эмпирических формул, полученных в результате обобщения результатов опытов по дренированию воды из колонн с грунтом [1] – [6].

Наиболее употребительными являются формулы О.Н.Носовой [4] и С.Ф.Аверьянова [5].

К несомненным достоинствам этих формул следует отнести простоту и вполне удовлетворительную в ряде случаев точность описания кривых равновесного влагосодержания реальных грунтов. Значительное неудобство расчетов по ним представляют параметры  $h_K^{cp}$  и  $h_K^M$ , характеризующие капиллярные свойства дренируемых грунтов. С.Ф.Аверьянов рекомендует принимать в качестве расчетного максимальное значение высоты капиллярного поднятия  $h_K^M$ , О.Н.Носова – высоту капиллярного подъема  $h_K^{cp}$ , соответствующую влажности, при которой в опытах по дренированию обычно наблюдается разрыв сплошности потока. Трудности, связанные с определением высоты капиллярного поднятия исследуемых грунтов, обусловлены тем обстоятельством, что в специальной литературе нет четких и однозначных критериев и рекомендаций относительно способа установления величин  $h_K^{cp}$  и  $h_K^M$ . Использование для этих целей кривой остаточного влагосодержания затруднительно, поскольку при значительных понижениях УГВ капиллярная влажность  $W_y$  весьма медленно убывает по высоте колонны (см. рис. 1), асимптотически приближаясь к предельному значению  $W_0$ .

Выполненное нами обобщение данных по распределению влаги в зоне ка-

пиллярной каймы в органоминеральных и песчаных грунтах показало, что эпюру влагосодержания целесообразно описывать в соответствии с выражением

$$W_y = W_0 + (W_{\Pi} - W_0) \exp^{-ay^n}, \quad (4)$$

где  $a$  и  $n$  — эмпирические коэффициенты, характеризующие структуру порового пространства грунта, степень его уплотнения, механический состав;  $W_0$  — наименьшая влагоемкость.

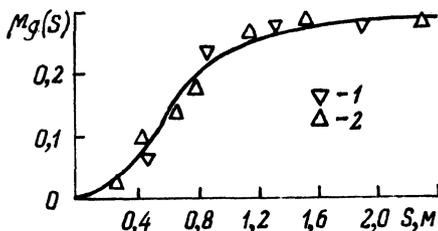
Анализ экспериментальных данных свидетельствует о том, что параметр  $n$  в выражении (4) без существенных погрешностей в результатах можно принимать равным 2.

При наличии экспериментальных данных по влагосодержанию в зоне неполного насыщения параметр  $a$  в уравнении (4) при  $n = 2$  легко определяется графически или аналитически (методом наименьших квадратов). В первом случае выражение (4) удобно представить в виде

$$\alpha = \frac{\ln[(W_{\Pi} - W_0)/(W_y - W_0)]}{y^2} \quad (5)$$

Тогда, откладывая по оси абсцисс значения  $y_i^2$ , а по оси ординат соответствующие величины  $\ln[(W_{\Pi} - W_0)/(W_{y_i} - W_0)]$ , коэффициент  $\alpha$  определяем как тангенс угла наклона осредняющей прямой, проведенной по экспериментальным точкам к оси абсцисс.

Рис. 2. Изменение коэффициента дифференциальной водоотдачи в зависимости от глубины стояния УГВ (по данным опытов в тензиометре со среднезернистым песком;  $d_{10} = 0,15$  мм,  $\eta = 2,3$ ). 1, 2 — первая и вторая повторности.



Для выполнения водобалансовых расчетов необходимо располагать расчетной формулой для коэффициента интегральной водоотдачи  $\mu_u(s)$ . Произведя интегрирование в выражении (2) с учетом (4) при  $n = 2$ , можно получить

$$\mu_u(s) = \mu_{\Pi} \left[ 1 - \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{as}} \operatorname{erf}(\sqrt{as}) \right], \quad (6)$$

где  $\mu_{\Pi} = (W_{\Pi} - W_0)$  — предельное значение коэффициента водоотдачи.

Для  $\mu_g(s)$ , исходя из уравнения (3), имеем

$$\mu_g(s) = \mu_{\Pi} (1 - \exp^{-as^2}). \quad (7)$$

Табл. 1. Зависимость  $\bar{\mu}_g(s) / \bar{\mu}_u(s) = f(\sqrt{a}s)$

$\sqrt{a}s$	0,05	0,2	0,4	0,7	1,0	2,0	4,0
$\bar{\mu}_u(s)$	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$	$5,09 \cdot 10^{-2}$	0,142	0,253	0,559	0,779
$\bar{\mu}_g(s)$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$3,92 \cdot 10^{-2}$	$1,48 \cdot 10^{-1}$	0,387	0,632	0,982	0,999
$\bar{\mu}_g(s) / \bar{\mu}_u(s)$	3,00	2,97	2,91	2,73	2,50	1,76	1,28

Примечание.  $\bar{\mu}_u(s) = \mu_u(s) / \mu_{\Pi}$ ;  $\bar{\mu}_g(s) = \mu_g(s) / \mu_{\Pi}$

В табл. 1 сопоставлены значения  $\bar{\mu}_u(s)$  и  $\bar{\mu}_g(s)$ , вычисленные по формулам (6) и (7).

Как следует из данных табл. 1, при небольших снижениях УГВ относительно поверхности грунта коэффициент дифференциальной водоотдачи  $\mu_g(s)$  превышает коэффициент интегральной водоотдачи приблизительно в 3 раза. В случае значительных понижений УГВ  $\mu_g(s)$  и  $\mu_u(s)$  стремятся к предельному значению  $\mu_{\Pi}$ , являющемуся константой для данного грунта.

Ограничиваясь первыми тремя членами разложения в ряд функции  $e^{-z^2}$ , из выражения (7) можно получить

$$\bar{\mu}_g(s) = [1 - e^{-z^2}] = 1 - (1 - z^2 + \frac{z^4}{4}) = as^2 (1 - \frac{as^2}{4}), \quad (8)$$

где  $z = \sqrt{as^2}$ .

Решая уравнение (8) относительно  $a$ , имеем

$$a = \frac{2(1 - \sqrt{1 - \bar{\mu}_g(s)})}{s^2} \quad (9)$$

Выражение (9) может быть использовано для ориентировочной оценки параметра  $a$  при  $\mu_g(s) \leq 0,4$ .

Учет влагозапасов зоны аэрации общепринято оценивать в миллиметрах водяного столба. Тогда, с учетом равенств (6) и (1), формулу для оценки водовместимости грунтов можно представить в виде

$$W(s) = 1000 s \mu_{\Pi} [1 - \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{a}s} \operatorname{erf}(\sqrt{a}s)]. \quad (10)$$

Для облегчения водобалансовых расчетов на основании формулы (10) разработана номограмма (рис. 3).

**Пример расчета.** УГВ отстоит от поверхности грунта на глубину 0,9 м. Емкостные характеристики грунта:  $a = 1,5 \text{ м}^{-2}$ ,  $\mu_{\Pi} = 0,3$ . Требуется определить, на какую величину изменится глубина стояния грунтовых вод в случае выпадения 50 мм осадков. За это же время горизонтальным дренажем с участка отводится 20 мм избыточных вод. Испарением и транспирацией можно пренебречь.

Расчет выполняем с использованием номограммы, приведенной на рис. 3. При  $s_0 = 0,9 \text{ м}$ ,  $a = 1,5 \text{ м}^{-2}$  и  $\mu_{\Pi} = 0,3$  по графику получаем  $G(s_0) = 79 \text{ мм}$ . В результате выпадения 50 мм осадков и отвода дренажем 20 мм избыточной

влаги водовместимость грунта в зоне аэрации уменьшится и составит  $G(S_1) = 79 - 50 + 20 = 49$  мм. При  $G(s_1) = 49$  мм и исходных  $\alpha$  и  $\mu_{II}$  получаем  $s_1 = 0,74$  м. Следовательно, УГВ повысятся на  $\Delta s = 0,90 - 0,74 = 0,16$  м.

Для определения положения УГВ в результате изменения влагозапасов в

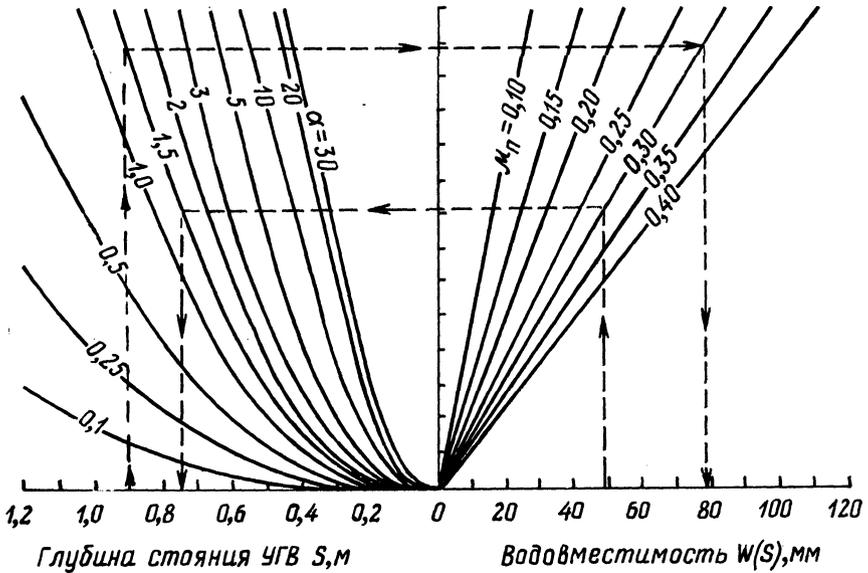


Рис. 3. Номограмма для оценки водовместимости дренируемых грунтов.

зоне аэрации может быть использована и формула (7). В этом случае расчет выполняется подбором:

$$\Delta s = \frac{\Delta G(s)}{\mu_{II}(1 - e^{-\alpha s_1^2})}, \quad (11)$$

где  $\Delta W(s)$  — изменение водовместимости в зоне аэрации;  $\Delta s$  — изменение глубины стояния грунтовых вод;

$$s_1 \begin{cases} (s_0 - \Delta s/2) & \text{— при повышении УГВ;} \\ (s_0 + \Delta s/2) & \text{— при понижении УГВ.} \end{cases}$$

В частности, для рассматриваемого случая, принимая в первом приближении  $\Delta s = 0,16$  м, по (1), имеем

$$\Delta s = \frac{30}{0,3(1 - \exp^{-1,5(0,9 - 0,16/2)^2})} = 15,7 \text{ мм} \approx 0,16 \text{ м.}$$

Решая (4) относительно  $u$ , можно получить расчетную зависимость для установления оптимальной глубины стояния УГВ, при которой для данного грунта

обеспечивается требуемая влажность в зоне аэрации, что важно при расчете горизонтального дренажа:

$$y = \sqrt{\frac{n \ln \frac{W_{\Pi} - W_0}{W_y - W_0}}{\alpha}} = \sqrt{\frac{n \ln (\mu_{\Pi} / \mu_g(y))}{\alpha}}. \quad (12)$$

Отметим также, что формула (4) применима и для количественной оценки высоты капиллярного поднятия грунтов. Так, если условиться считать максимальной высотой капиллярного поднятия  $t_u$ , при которой капиллярная влажность отличается от минимальной влагоемкости  $W_0$  на 5 % (см. рис. 1), по (12) получаем

$$y = h_{\text{к}}^{\text{М}} = \sqrt{\frac{n \ln \frac{1 - \bar{W}_0}{0,05 \bar{W}_0}}{\alpha}}.$$

где  $\bar{W}_0 = W_0 / W_{\Pi}$ .

Если исходить из рекомендаций О.Н.Носовой [4], то для средней высоты капиллярного поднятия при  $W_y = 0,8 W_{\Pi}$  можно получить

$$y = h_{\text{к}}^{\text{ср}} = \sqrt{\frac{n \ln \frac{1 - \bar{W}_0}{0,8 - \bar{W}_0}}{\alpha}}.$$

Разработанные формулы для  $\mu_g(s)$  и  $\mu_u(s)$  содержат параметры, однозначно определяемые по данным лабораторных или полевых опытов. Для определения коэффициентов  $W_0$ ,  $W_{\Pi}$ ,  $\alpha$  в зависимостях (4), (6), (7), (10) могут быть использованы общепринятые методы определения емкостных характеристик грунтов: высоких колонн, тензиметрический и метод капилляриметра [6].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев А.Ф. Почвенные и грунтовые воды. — М.—Л., 1936. — 316 с.
2. Романов В.В. Водные свойства сфагнового оеса. — Труды ГГИ. Л., 1949, вып. 13/67. — 300 с.
3. Луиди К.В. Водные свойства торфяной залежи. — Минск, 1964. — 260 с.
4. Носова О.Н. Расчет водоотдачи песчаных грунтов. — М.—Л., 1962. — 116 с.
5. Аверьянов С.Ф. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод. — В кн.: Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод. М., 1956. — 150 с.
6. Афанасиук Г.И., Луиди К.П. Методические указания по определению водно-физических свойств почвогрунтов мелиорируемых земель. — Минск, 1973. — 82 с.