

в 1,25 раза дольше, чем при форсированном релейном управлении. Следует заметить, что второй показатель относится к принятым условиям фильтрации. Для других условий он может изменяться в сторону как увеличения, так и уменьшения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сельченко В.П., Мордухович Б.Ш. Оптимальное по быстродействию управление уровнями грунтовых вод при шлюзовании. — В кн.: Мелиорация переувлажненных земель. Минск, 1977, т. XXV, с. 29—36.
2. Зубец В.М., Сельченко В.П., Мордухович Б.Ш. Автоматизация управления водным режимом на осушительно-увлажнительных системах. М., 1978, т. XXVI, с. 3—10.
3. Сельченко В.П., Мордухович Б.Ш. Расчет оптимального по быстродействию управления УГВ в автоматизированных осушительно-увлажнительных системах. — В кн.: Конструкции и расчет осушительно-увлажнительных систем. Минск, 1978, вып. 3, с. 12—18.
4. Мордухович Б.Ш., Сельченко В.П. Оптимальная нейтрализация осадков и испарения в автоматизированных осушительно-увлажнительных системах. — Там же, 1979, вып. 4, с. 6—15.
5. Сельченко В.П., Мордухович Б.Ш. Расчет алгоритмов управления УГВ и параметров осушительно-увлажнительных систем с учетом переходных процессов в мелиоративной сети. — В кн.: Мелиорация переувлажненных земель. Минск, 1980, т. XXVIII, с. 229—240.
6. Сельченко В.П., Мордухович Б.Ш. Оптимальная стабилизация УГВ в автоматизированных осушительно-увлажнительных системах. — В кн.: Научные основы проектирования и строительства гидромелиоративных систем. Минск, 1984, с. 12—24.

УДК 626.8:624.131.6

Г.В.ЩЕРБАКОВ, канд. техн. наук (БПИ),  
К.К.ЖИБУРTOVИЧ (БелНИИМВХ)

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОВМЕСТИМОСТИ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ПО ДАННЫМ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА

Эффективность принимаемых проектных решений в области водохозяйственного строительства в значительной мере определяется точностью и надежностью прогнозных фильтрационных расчетов. Внедрение ЭЦВМ позволяет успешно реализовывать в расчетах математические модели оптимальной сложности.

По мнению С.Ф.Аверьянова, допустимая погрешность в определении расчетных значений емкостных и фильтрационных параметров не должна превышать 10% [1].

Одним из основных факторов, характеризующих способность дренируемых грунтов отдавать или вмещать воду при колебаниях УГВ, является коэффициент водоотдачи. Обобщающие исследования по данному вопросу, к сожалению, отсутствуют, а имеющиеся предложения зачастую противоречивы и недостаточно обоснованы. В частности, расчетные значения коэффициента водоотдачи предлагается принимать в зависимости от глубины стояния УГВ и водопроницаемости грунтов [2], характерного диаметра [3], скорости изменения УГВ [4] и других факторов [5, 6]. Приводимое описание грунтов в большинстве случаев недостаточно характеризует их текстуру, гранулометрический состав, плотность сложения, содержание глинистых частиц и т.д.

Основная цель выполненных нами исследований состояла в обобщении результатов опытов по определению коэффициента текущей (дифференциальной) водоотдачи  $\mu_d(s)$  для средне- и крупнозернистых песков различного гранулометрического состава. Ставилась задача подобрать такую непрерывную и дифференцируемую функцию, которая бы позволила при минимальном числе параметров учесть особенности изменения  $\mu_d(s)$  в зоне неполного насыщения в зависимости от глубины стояния УГВ.

На основе применения методов планирования эксперимента в тензиометрах была выполнена в трехкратной повторности серия опытов по оценке в равновесных условиях водоудерживающей способности отмытых песчаных смесей различного гранулометрического состава. Подробное описание методики содержится в литературе [7].

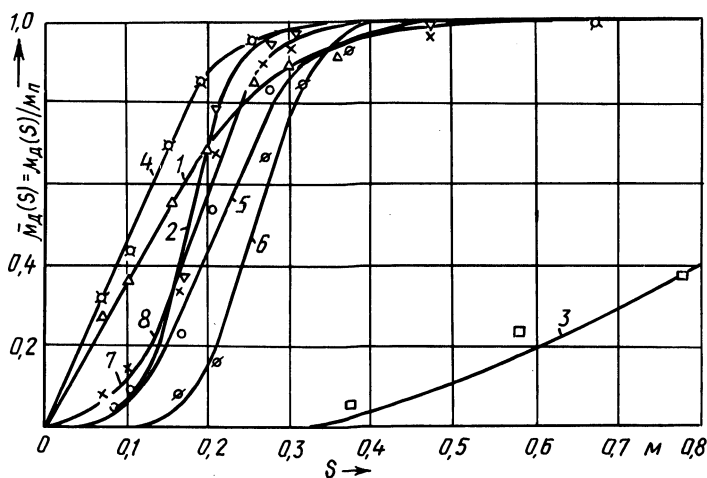


Рис. 1. Характер изменения нормированного коэффициента текущей водоотдачи  $\bar{\mu}_d(s)$  в зависимости от глубины стояния УГВ:

— расчетные кривые, номера опытов см. в табл. 1.

В табл. 1 и на рис. 1 приведены средние (по результатам трех параллельных опытов) значения нормированного коэффициента дифференциальной (текущей) водоотдачи

$$\bar{\mu}_d(s) = \mu_d(s) / \mu_n, \quad (1)$$

где  $\mu_n$  — предельное значение коэффициента водоотдачи, являющееся физической константой грунта. Рекомендации по обоснованию расчетных значений  $\mu_n$  изложены нами ранее в работе [7].

Для аналитического описания кривых, характеризующих изменения  $\bar{\mu}_d(s)$  в функции от  $s$  использовали функцию нормального, логнормального распределения и распределения Вейбулла. В качестве аргумента принимали значения  $s, 1/s, \ln 1/s$ . Для проверки согласия опытного и теоретического распределений использовали критерий Колмогорова. На клетчатке вероятностей

Таблица 1. Результаты опытов в тензиометре

Опыт 1		Опыт 2		Опыт 3		Опыт 4		Опыт 5		Опыт 6		Опыт 7		Опыт 8	
s, м	$\bar{\mu}_A$ (s)	s, м	$\bar{\mu}_A$ (s)	s, м	$\bar{\mu}_A$ (s)	s, м	$\bar{\mu}_A$ (s)	s, м	$\bar{\mu}_A$ (s)	s, м	$\bar{\mu}_A$ (s)	s, м	$\bar{\mu}_A$ (s)	s, м	$\bar{\mu}_A$ (s)
0,070	0,271	0,075	0,0510	0,372	0,054	0,075	0,326	0,075	0,069	0,075	0,024	0,075	0,081	0,075	0,165
0,105	0,363	0,172	0,367	0,570	0,234	0,110	0,438	0,113	0,105	0,172	0,080	0,113	0,147	0,110	0,209
0,160	0,550	0,210	0,780	0,770	0,366	0,155	0,698	0,172	0,240	0,210	0,149	0,172	0,327	0,155	0,312
0,200	0,680	0,270	0,932	0,870	0,427	0,195	0,848	0,210	0,462	0,270	0,663	0,210	0,658	0,195	0,417
0,260	0,858	0,315	0,952	1,060	0,711	0,260	0,951	0,270	0,793	0,315	0,844	0,270	0,891	0,260	0,714
0,300	0,889	0,470	0,970	1,260	0,894	0,300	0,959	0,308	0,889	0,372	0,910	0,308	0,930	0,300	0,844
0,355	0,903	0,670	0,978	1,460	0,974	0,355	0,968	0,372	0,932	0,670	0,933	0,372	0,939	0,355	0,938
0,860	0,941	1,97	0,999	1,660	0,985	0,860	0,988	0,470	0,940	1,970	0,999	0,470	0,949	0,860	0,983
1,860	0,999	—	—	1,860	0,993	1,860	0,999	0,970	0,983	—	—	0,970	0,978	1,860	0,999
$d_{10} = 0,38$		$d_{10} = 0,38$		$d_{10} = 0,05$		$d_{10} = 0,49$		$d_{10} = 0,16$		$d_{10} = 0,16$		$d_{10} = 0,27$		$d_{10} = 0,27$	
U = 7,6		U = 2,4		U = 5,0		U = 5,0		U = 7,6		U = 2,4		U = 5,0		U = 5,0	

82

Примечание.  $U = d_{60}/d_{10}$  — коэффициент неоднородности грунта.

(рис. 2) по оси абсцисс откладывались значения  $\bar{\mu}_d(s)$ , а по оси ординат —  $\chi$ ,  $1/s$  или  $\ln 1/s$ . В последнем случае модель грунта представляет систему плоских капилляров с радиусами, распределенными по логарифмически нормальному закону [8]. Анализ результатов показал, что наилучшее приближение к прямой имели графики, построенные на координатной сетке нормального

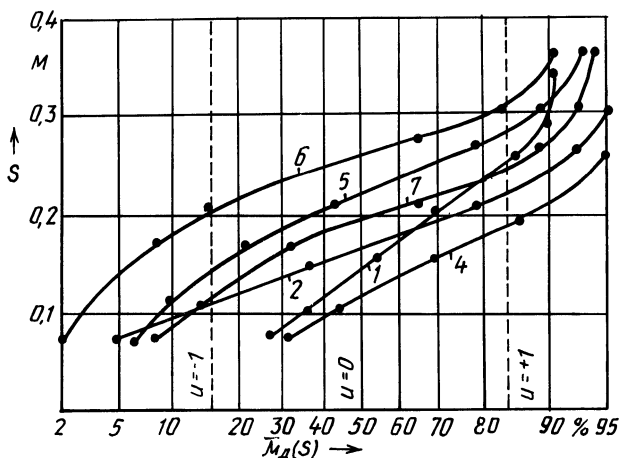


Рис. 2. Вероятностный трафарет для определения  $s_{cp}$  и  $\sigma$  графоаналитическим методом (номера опытов см. в табл. 1).

распределения, когда в качестве аргументов использовались значения  $s$  и  $\ln 1/s$ . С учетом прикладной направленности исследований, нами детально анализировался случай  $\bar{\mu}_d(s) = f(s)$ , обеспечивающий большую точность и более простую структуру итоговых расчетных зависимостей. Было установлено: гипотеза о принадлежности в этом случае опытных данных нормальному распределению (по критерию Колмогорова) не отвергается при уровне значимости  $\alpha \leq 0,05$ .

Учитывая, что понижение УГВ ( $s$ ) может изменяться от 0 до  $+\infty$  и применяя одностороннее усечение, имеем

$$\begin{aligned} \bar{\mu}_d(s) &= \frac{C}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^s \exp\left[-\frac{(s-s_{cp})^2}{2\sigma^2}\right] ds = \frac{F\left(\frac{s-s_{cp}}{\sigma}\right) - F\left(-\frac{s_{cp}}{\sigma}\right)}{1 - F\left(-\frac{s_{cp}}{\sigma}\right)} = \\ &= 1 - \frac{1 - F\left(\frac{s-s_{cp}}{\sigma}\right)}{F\left(\frac{s_{cp}}{\sigma}\right)} = 1 - \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{s-s_{cp}}{\sigma\sqrt{2}}\right)}{2 - \operatorname{erfc}\left(\frac{s_{cp}}{\sigma\sqrt{2}}\right)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $C = \frac{1}{1 - F\left(-\frac{s_{cp}}{\sigma}\right)}$  — коэффициент усечения;  $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z)$ ;

$\operatorname{erf}(z)$  — функция ошибок;  $F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} \exp(-z^2/2) dz$  — функция Лапласа

$s_{cp}$ ,  $\sigma$  — параметры нормального распределения.

Для определения параметров  $s_{cp}$  и  $\sigma$  в формуле (2) использовали графоаналитический метод. Для этого через точки, координатами которых являются соответствующие значения  $s_i$  и  $\bar{\mu}_d(s_i)$ , нанесенные на вероятностном трафарете (см. рис. 2), проводились прямые. На прямой находили точки, имеющие абсциссы  $U = -1; 0; +1$ . Известно, что в случае соответствия эмпирического и теоретического нормального распределения ординаты этих точек:  $(s_{cp} - \sigma)$ ,  $s_{cp}$  и  $(s_{cp} + \sigma)$ . Отсюда легко получить оценки для  $s_{cp}$  и  $\sigma$ .

Следует иметь в виду, что полученные таким образом параметры являются эффективными оценками для нормального распределения. В случае же его усечения можно подобрать другую пару значений  $s_{cp_i}$  и  $\sigma_i$  в формуле (2), при которых среднеквадратичное отклонение между опытными и расчетными значениями  $\bar{\mu}_d(s)$  будут меньшими [9]. В табл. 2  $s_{cp}$  и  $\sigma$ , полученные графоаналитически, сопоставлены с результатами численных расчетов для усеченного нормального распределения, выполненных на ЭВМ.

Как следует из таблицы, расчеты по обеим методикам приводят к близким результатам. Высокое значение корреляционного отношения, зафиксированного во всех опытах ( $s \geq 0,988$ ), и данные, приведенные на рис. 1, свидетельствуют о том, что предлагаемая расчетная зависимость (2) позволяет достаточно полно учитывать особенности распределения влаги в зоне капиллярного насыщения песчаных грунтов выше УГВ.

Для определения водовместимости необходимо располагать данными по коэффициенту суммарной (интегральной) водоотдачи грунтов, определяемому на основании выражения

$$\bar{\mu}_и(s) = 1/s \int_0^s \mu_d(y) dy, \quad (3)$$

где  $\bar{\mu}_и(s) = \mu_и(s) / \mu_n$ .

Таблица 2. Сопоставление параметров  $s_{cp}$  и  $\sigma$ , полученных графоаналитическим и численным методом

Параметры	Номер опыта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Графоаналитический метод								
$s_{cp}$	0,133	0,184	0,860	0,119	0,217	0,257	0,192	0,200
$\sigma$	0,11	0,034	0,28	0,076	0,067	0,057	0,065	0,108
Численный метод на ЭВМ								
$s_{cp}$	0,163	0,183	0,883	0,107	0,220	0,260	0,190	0,197
$\sigma$	0,070	0,05	0,30	0,083	0,077	0,057	0,070	0,110
r	0,988	0,990	0,991	0,996	0,996	0,990	0,993	0,994

Примечание. r — корреляционное отношение.

По формуле (3) с учетом выражения (2) получаем

$$\bar{\mu}_n(s) = 1 - \frac{\text{ierfc}\left(-\frac{s_{cp}}{\sigma\sqrt{2}}\right) - \text{ierfc}\left(\frac{s-s_{cp}}{\sigma\sqrt{2}}\right)}{\frac{s}{\sigma\sqrt{2}} \left[2 - \text{erfc}\left(\frac{s_{cp}}{\sigma\sqrt{2}}\right)\right]} \quad (4)$$

Здесь  $\text{ierfc}(t) = \int_t^{\infty} \text{erfc}(z) dz$ .

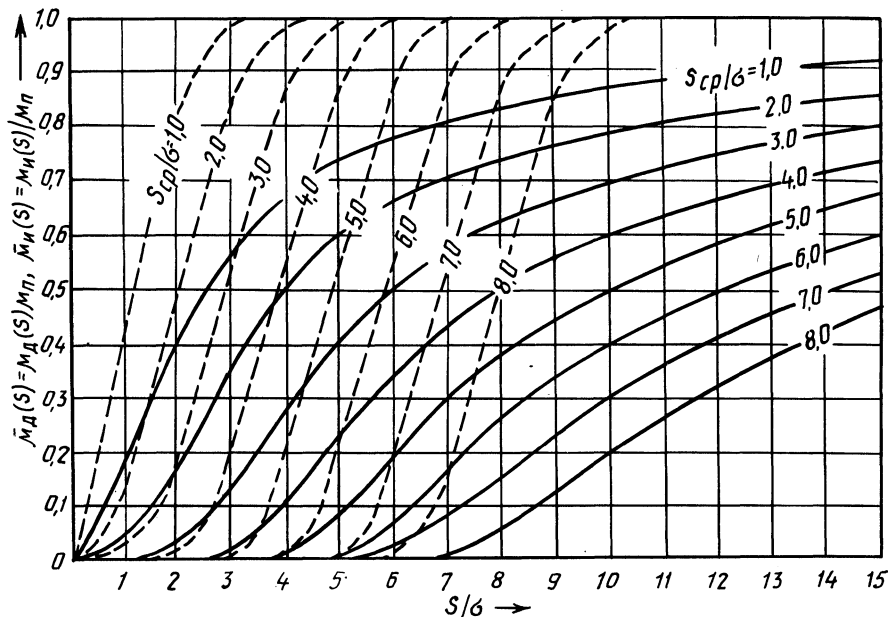


Рис. 3. Характер изменения  $\bar{\mu}_n(s) = f_1\left(\frac{s}{\sigma}, \frac{s_{cp}}{\sigma}\right)$  и  $\bar{\mu}_d(s) = f_2\left(\frac{s}{\sigma}, \frac{s_{cp}}{\sigma}\right)$ :

— для  $\bar{\mu}_n(s)$ ; --- для  $\bar{\mu}_d(s)$ .

На рис. 3 приведен график, построенный на основании формул (2) и (4), пользуясь которым можно легко определить значения  $\bar{\mu}_d(s)$  и  $\bar{\mu}_n(s)$  в зависимости от  $s/\sigma$  и  $s_{cp}/\sigma$ . Например, при  $\mu_n = 0,3$ ,  $s_{cp} = 0,1$ ,  $\sigma = 0,05$ ,  $s = 0,4$  м по номограмме, приведенной на рис. 3, имеем:

$$s_{cp}/\sigma = 2; s/\sigma = 8 \text{ и } \bar{\mu}_n(s) = 0,75.$$

Следовательно, водовместимость грунта составляет

$$\sigma(s) = 1000 \mu_n \cdot \bar{\mu}_n(s) s = 1000 \cdot 0,3 \cdot 0,75 \cdot 0,4 = 90 \text{ мм.}$$

Для ориентировочной оценки параметров  $\mu_n$ ,  $s_{cp}$  и  $\sigma$ , входящих в формулы (2) и (4), на основе обработки данных регрессионных экспериментов

получены эмпирические формулы в виде алгебраических полиномов в функции от характерного диаметра  $d_{10}$  и коэффициента неоднородности  $U$ :

$$\mu_n = 0,346 + 0,332 d_{10} - 0,064 U - 0,463 d_{10}^2 + 0,052 U^2; \quad (5)$$

$$s_{cp} = 0,34 - 0,36 d_{10} - 0,01 U; \quad (6)$$

$$\sigma = 0,038 + 0,027 d_{10} + 0,004 U. \quad (7)$$

Зависимость (5) справедлива при  $0,05 \leq d_{10} \leq 0,5$ ,  $2,4 \leq U \leq 7,6$ ; зависимости (6) и (7) — при  $0,10 \leq d_{10} \leq 0,4$ ,  $2,4 \leq U \leq 7,6$ .

Полученные расчетные зависимости позволяют более полно по сравнению с имеющимися учитывать полезную информацию, полученную в процессе анализа гранулометрического состава песчаных грунтов. Их применение наиболее целесообразно при оценке водовместимости дренируемых средне- и крупнозернистых песчаных грунтов, а также при проведении водобалансовых расчетов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А в е р ь я н о в С.Ф. Борьба с засолением орошаемых земель. М., 1978. — 288 с.
2. Э р к и н Г.Д. Осушение заболоченных аллювиальных почв. — В кн.: Освоение заболоченных земель: Тр. Всесоюз. науч.-исследовательск. ин-та болотного хозяйства. Минск, 1937, с. 147—151.
3. К а п о т о в а Н.И. Водоотдача водоносных грунтов. — Тр. ГГИ, вып. 194. Л., 1972, с. 218—241.
4. Б а р о н В.А. Неустановившийся режим фильтрации подземных вод в безнапорном пласте. — Тр. ВНИИ гидролог. и инж. геолог., вып. 127, М., 1979, с. 18—29.
5. П р о с к у р н и к о в С.М. Экспериментальные данные по изучению движения капиллярной воды в песке. — Тр. ГГИ, вып. 8 (62). Л., 1948, с. 150—174.
6. Н о с о в а О.Н. Расчет водоотдачи песчаных грунтов. М. — Л., 1962. — 116 с.
7. Щ е р б а к о в Г.А., Ж и б у р т о в и ч К.К. Определение водоотдачи песчаных грунтов по данным гранулометрического состава. — В кн.: Водное хозяйство и гидротехническое строительство. Минск, 1985, вып. 14, с. 93—99.
8. П о л у б а р и н о в а-К о ч и н а П.Я., П р я ж и н с к а я В.Г., Э м и х В.Н. Математические методы в вопросах орошения. М., 1969. — 414 с.
9. П о л л а р д Дж. Справочник по вычислительным методам статистики (Пер. с англ.). — М., 1982. — 344 с.

УДК 626.823

С.П.ГАТИЛЛО, И.В.ФИЛИППОВИЧ,  
канд. техн. наук (БПИ)

### УЧЕТ ПОДТОПЛЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ ТРУБЧАТЫХ ВОДОПРОПУСКНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Трубчатые водопропускные сооружения на каналах мелиоративных систем часто работают с затопленным выходным сечением. Уровень нижнего бьефа обычно значителен в паводки и половодья и может оказывать влияние на уровень верхнего бьефа, что иногда приводит к затоплению земель выше таких сооружений. Поэтому без учета подобного явления невозможно правильно провести гидравлические расчеты трубчатых сооружений.