

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ЗАПОЛНЕНИИ ВОДОХРАНИЛИЩА

А.Е. КАЧАЕВ, С.С. ТУРАПИН

Ключевые слова: напряженно-деформационно-фильтрационное состояние, грунтовая плотина, поровое давление, кривая депрессии, грунт, гидротехническое сооружение.

Keywords: stress-strain-filtration state, soil dam, pore pressure, depression curve, soil, hydraulic engineering structure.

Аннотация. В статье представлена методика численного моделирования для оценки устойчивости грунтовой плотины при различном заполнении водохранилища (в том числе при быстрой сработке водохранилища как случая, при котором плотина максимально нагружена различным динамическим воздействием водных масс). Методика численного моделирования напряженно-деформационно-фильтрационного состояния грунтовой плотины в ПК PLAXIS 2D разработана с учетом различных условий нагружения объекта, в том числе при быстрой сработке водохранилища. По данной методике численные результаты порового давления P_{act} и коэффициента устойчивости k_{st} при различных режимах работы грунтовой плотины (при различных фазовых состояниях плотины). Определены параметры коэффициента устойчивости для каждой из фаз, рассмотренных в исследовании.

Abstract. The article presents a numerical modeling technique for assessing the stability of a soil dam under various reservoir conditions (including rapid reservoir discharge, as a case in which the dam is maximally loaded by various dynamic effects of water masses). A technique has been developed for numerical modeling of the stress-strain-filtration state of a soil dam in a PLAXIS 2D PC, taking into account various loading conditions of the facility, including during rapid reservoir operation. Numerical results of the pore pressure P_{act} and the k_{st} stability coefficient have been obtained for different operating modes of a soil dam (under different phase states of the dam). The parameters of the stability coefficient for each of the phases considered in the study are determined.

Введение. В настоящее время является актуальным вопрос о безопасном использовании и возможных методах реконструкции гидротехнических сооружений с большим сроком эксплуатации (более 25 лет). Однако необходимо отметить, что моделирование гидрологических процессов в таких сооружениях должным образом не проводится, а последующие работы в рамках проектов по их реконструкции малоэффективны и небезопасны [1].

В нашей стране большинство грунтовых плотин никогда не поддавались реальным наблюдениям, которые могли бы зафиксировать их состояние и проанализировать работоспособность сооружений. Отсутствуют надежные данные для сравнения с расчетами, такими как фильтрация, поровое давление в материале ядра и его откосах, осадки, смещения и др. [2].

Безопасностью эксплуатации, а также натурными наблюдениями за фильтрацией, поровым давлением, осадками и смещением плотины с ядром (высокими) стали заниматься в период строительства грунтовых плотин после 50-х годов прошлого века. Среди ученых, занимающихся проблемами гидротехнических сооружений, можно отметить исследования: Н.А. Анискина [3], В.М. Никитина [4], М.Н. Леднева [5], С.С. Турапина [6–7].

Моделирование грунтовых плотин при их проектировании или обследовании на сегодняшний день невозможно без BIM-технологий в строительстве [8–10]. Подобные технологии помогают получить не только численные модели эксплуатируемых плотин, но и эффек-

тивно разработать методы по их реконструкции с учетом трехмерных особенностей грунтов.

Целью исследования является разработка с помощью программного комплекса методики численного моделирования для оценки устойчивости грунтовой плотины при различном заполнении водохранилища (в том числе при быстрой сработке водохранилища).

Исследование проблемы нестационарной фильтрации в условиях резкого падения уровня верхнего бьефа с акцентом на грунтовые плотины и дамбы было предметом анализа в работах как отечественных, так и зарубежных ученых [11–12].

Тематики исследований в этой области различны. Стоит отметить, что в этих работах обращается внимание на исследование состояний грунтовых плотин на различных грунтах, физико-механические характеристики которых моделируются в соответствии с определенными особенностями той или иной местности. В последние годы для анализа устойчивости откосов грунтовых плотин в различных ситуациях снижения уровня воды в водохранилище, включая задачи нестационарной фильтрации, активно используются численные методы. Среди них особенно выделяется метод конечных элементов (МКЭ) [13].

Методы и объект исследования. В работе представлены подходы и результаты численного анализа проблемы устойчивости откоса земляной плотины в условиях экстренной разрядки увеличенного объема водохранилища. Для расчетов использован программный комплекс PLAXIS 2D, применяющий мелкую расчетную сетку метода конечных элементов. Объектом моделирования является приведенная симметричная грунтовая плотина с ядром, показанная на рис. 1.

Модель плотины, которая принята для исследования, имеет высоту 30 м, ширину в основании 172,5 м и ширину по гребню 5 м. Плотина для отработки методики принята состоящей из глинистого ядра и отсыпанных боковых призм (откосов). В основании гидротехнического сооружения залегает переуплотненный заиленный песок, условно названный подстилающим грунтом. Для нашей модели учтем его на глубине равной 30 м. Примем нормальную высоту уровня воды в водохранилище равной 25 м.

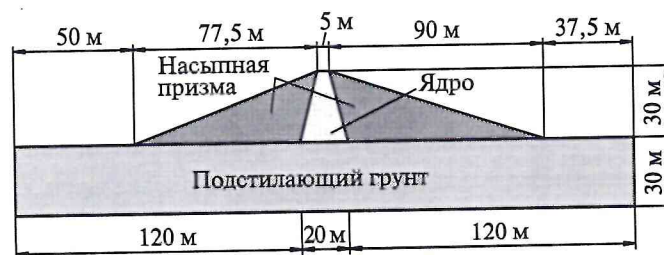


Рис. 1. Габаритно-расчетная схема решаемой задачи грунтовой плотины

Для подстилающего грунта используется модель Мора-Кулона и тип подстилающего грунта Drained – дренированный. Для этой модели важно учесть поведение неположительно водонасыщенных грунтов выше уровня грунтовых вод. Поэтому выбирается для грунтов гидравлическая модель Ван Гинухтена [14].

Физико-механические свойства подстилающего грунта (легкий суглинок с плотностью 1700 кг/м³) представлены в табл. 1, 2-я колонка.

Для насыпных откосов также используется модель Мора-Кулона и тип поведения Drained – дренированный. Зададим механические, физические и фильтрационные параметры (табл. 1, 3-я колонка). Материал условно относится к суглинкам со средней плотностью 1600 кг/м³.

Для ядра плотины используется модель Мора-Кулона и тип поведения Undrained (B) – недренированное. Модуль деформации и сопротивление не дренированному сдвигу ядра изменяется с глубиной. Для этого задается приращение этих параметров (табл. 1, 4-я колонка). Условный грунт для расчета принимаем в виде переуплотненного суглинка со средней плотностью 2200 кг/м³.

Для получения достоверных результатов в разрабатываемой методике в соответствии с возможностями ПК PLAXIS 2D моделируется напряженно-деформационное состояние плотины с различными фильтрационными показателями. Точность результатов расчета при помощи МКЭ достигается правильной разбивкой объекта по расчетной сетке. Численное моделирование напряженно-деформационного и фильтрационного состояния производится по всей площади модели, однако произвольная точка необходима для построения в дальнейшем графика зависимости коэффициента запаса устойчивости плотины k_{st} от полного перемещения в ядре дамбы. Так образу-

ется последовательно построенная плоская модель в КЭ, которая учитывает различные физико-механические характеристики грунтов по модели Ван Генухтена [14].

Основная часть. Исследуемыми функциями, которые определяют устойчивость грунтовых плотин во времени, будем считать величины порового давления P_{activ} для четырех случаев фильтрации воды через гидротехническое сооружение, а также состояние грунтов, характеризующееся кривой депрессии. Рассматриваемые случаи представлены фазами:

- фаза 1 – с установившимся состоянием при высоком уровне воды в водохранилище;
- фаза 2 – с быстрым понижением уровня воды при быстрой сработке водохранилища (нестационарный режим, продолжительность 5 сут);
- фаза 3 – с медленным понижением уровня воды (нестационарный режим, продолжительность 50 сут);
- фаза 4 – с установившимся состоянием при низком уровне воды в водохранилище.

На рис. 2а представлено распределение порового давления в фазе с установившимся состоянием при высоком (обычном) уровне воды в водохранилище. Здесь значение порового давления выше уровня грунтовых вод – положительно. При численном моделировании в ПК PLAXIS 2D для этой области произведен учет всасывания и построена кривая депрессии. По полученной кривой видим, насколько тело плотины находится в безопасных условиях в случае пучения грунтов от промерзания, а также для подсчета коэффициента запаса на устойчивость низового откоса. Максимальное поровое давление P_{activ} определяется в нижних слоях подстилающего грунта со стороны водохранилища и составляет 589 кН/м².

В фазе, показанной на рис. 2б и связанной с быстрым понижением уровня воды, после небольшого спада видно, что в объеме проницаемого тела в глинистом ядре образовалась локальная кривая депрессии из-за низких значений коэффициента фильтрации.

Это связано с разностью скоростей сработки водохранилища и фильтрации в (нефильтруемом) ядре плотины. Результаты численного моделирования, полученные по данной фазе, соответствуют выводам исследований, опубликованным авторами в работах [3–5]. Для этой фазы максимальное поровое давление P_{activ} определяется в нижних слоях подстилающего грунта под внутренним откосом плотины и равно 511 кН/м².

Физико-механические свойства грунтов

Таблица 1

Параметры	Величина		
	Подстилающий грунт	Призмы (откосы)	Ядро
1	2	3	4
Удельный вес грунта при естественной влажности, кН/м ³	17	16	22
Удельный вес грунта в водонасыщенном состоянии, кН/м ³	21	20	25
Начальный коэффициент пористости	0,5	0,5	0,5
Эффективный модуль Юнга, кН/м ²	50·10 ³	20·10 ³	1,5·10 ³
Коэффициент Пуассона	0,3	0,33	0,35
Модуль сдвига, кН/м ²	19,23·10 ³	7519	555.600
Касательный одометрический модуль деформации, кН/м ²	6,73·10 ³	29,63·10 ³	2407
Параметр референсного давления, кН/м ²	1	5	5
Угол внутреннего трения, рад	35	31	0
Угол дилатансии, рад	5	1	0
Скорость прохождения поперечных волн, м/с	105,3	67,9	18,46
Скорость прохождения продольных волн, м/с	197,1	134,8	38,42
Коэффициент фильтрации по оси X	0,01	1	0,1·10 ⁻³
Коэффициент фильтрации по оси Y	0,01	1	0,1·10 ⁻³
Глубинный параметр неравномерности распределения дилатансии, м	10·10 ³	10·10 ³	10·10 ³
Удельный параметр неравномерности распределения дилатансии, 1/м	5,33·10 ⁻⁶	0,13·10 ⁻³	0,18·10 ⁻³
Реологический модуль	1000·10 ¹²	1000·10 ¹²	1000·10 ¹²

Рассмотрим изменение порового давления для фазы медленного понижения уровня воды. В этом случае из-за замедленного понижения уровня воды в левой части в ядре плотины образуются двухскатная кривая депрессии. Такая картина является характерной для такого поведения грунтов плотины и связана с непроницаемостью материала ее ядра (рис. 2в).

Кривая депрессии в зоне ядра плотины будет иметь два функциональных разрыва — они соответствуют основным законам фильтрации за пределами применения закона Дарси [1]. Максимальное поровое давление $P_{\text{актив}}$ в нижних слоях подстилающего грунта равно 472 кН/м^2 .

На рис. 2г показано распределение порового давления $P_{\text{актив}}$ при низком уровне воды. Область синего цвета в ядре плотины связана с высоким значением давления всасывания. При этом необходимо заметить, что уровень воды может быть более плавным, если для расчета в ПК PLAXIS 2D измельчить сетку в ядре. Аппроксимированная кривая депрессии имеет линейный характер, поровое давление $P_{\text{актив}}$ в грунтах распределяется пропорционально значениям кривой депрессии. Верхняя часть плотины обозначена в синей цветовой гамме, так как находится в разгруженном состоянии (здесь среднее поровое давление $P_{\text{актив}}$ составляет 47 кН/м^2). Максимальные значения порового давления $P_{\text{актив}}$ в желто-красной зоне подстилающего грунта составляют $285...350 \text{ кН/м}^2$.

Особое внимание в исследовании уделяется тому, как меняется коэффициент устойчивости плотины при различных фазах. Для того чтобы посмотреть на это изменение построим график зависимости коэффициента устойчивости плотины от полного перемещения в водонепроницаемом ядре дамбы (рис. 3). Для этого определяем суммарный коэффициент устойчивости гидротехнического сооружения. Из графика видно, что для всех фаз коэффициент устойчивости плотины обеспечивается, что позволит плотине работать и находится в состоянии эксплуатационной надежности.

Такие результаты в представленной методике по оценки устойчивости грунтовых плотин на основе формирования напряженно-деформационно-фильтрационной модели говорят о том, что цель настоящего исследования достигнута. Исследование проведено на основе полученных численных значений функций отклика, заявленных в работе для гидротехнического сооружения подобного типа в соответствии с представленным подходом моделирования различных схем нагружения ГТС.

Выводы. Разработана методика численного моделирования напряженно-деформационно-фильтровального состояния грунтовой плотины в ПК PLAXIS 2D с учетом различных условий нагружения объекта, в том числе при экстренной сработке водохранилища. Получены численные результаты порового давления $P_{\text{актив}}$ и коэффициента устойчивости $k_{\text{ст}}$ при различных режимах работы грунтовой плотины (при различных фазовых состояниях плотины).

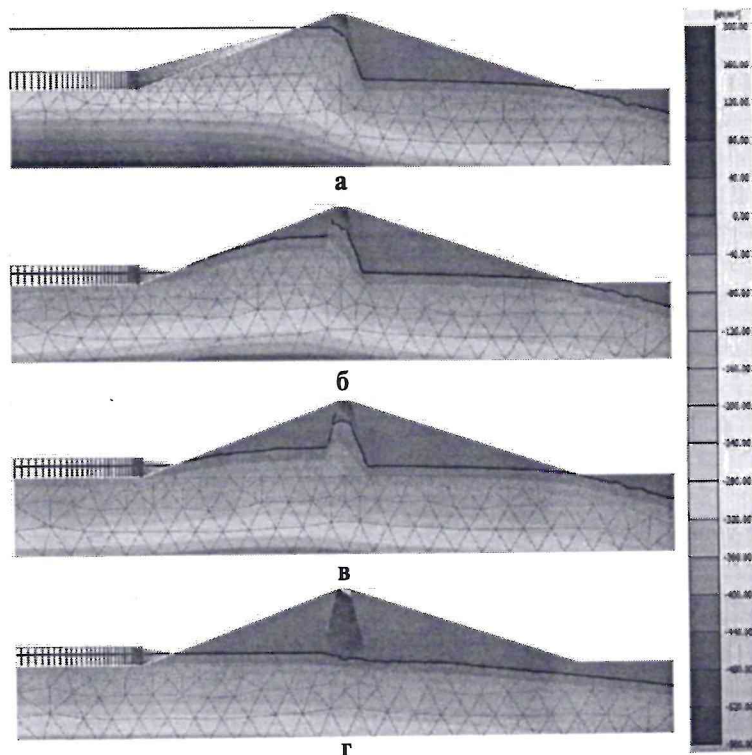


Рис. 2. Активное поровое давление $P_{\text{актив}}$ и кривая депрессии: а — фаза 1; б — фаза 2; в — фаза 3; г — фаза 4

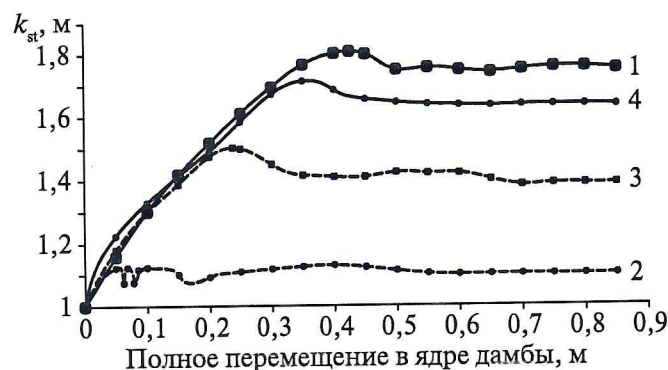


Рис. 3. График зависимости коэффициента устойчивости плотины от полного перемещения в ядре дамбы: 1 — фаза 1; 2 — фаза 2; 3 — фаза 3; 4 — фаза 4

Определены параметры коэффициента устойчивости для каждой из фаз, рассмотренных в исследовании: в статическом состоянии грунтовые плотины с величиной уровня в верхнем бьефе 20 м и более должны быть обеспечены высоким коэффициентом устойчивости (выше средних значений $k_{\text{ст}} = 1,25...1,65$ [13], или проектироваться в сочетании с каменно-бетонными материалами). Результаты численного моделирования подтверждены ранее проведенными исследованиями, которые указаны в ссылках основного текста представленного исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гидротехнические сооружения: Часть 1/М. Гришин, С. Слиский, А. Антипов, Г. Воробьев, В. Иванищев, В. Орехов, Г. Пашков, В. Поспелов, Л. Рассказов. М.: Высшая школа, 1979. 615 с.
2. Reinius E. The stability of the upstream slope of earth dams. Stockholm, 1948. 120 p.

3. Анискин Н.А., Сергеев С.А. Устойчивость откоса грунтовой плотины при сработке водохранилища // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. Вып. 3. Ст. 1. С. 6–17. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.3.1.
4. Никитин В.М. Долгосрочный прогноз осадок каменно-набросных плотин // Тр. Ташкент ин-та инж. ирригации и механиз. с. х. 1973. Вып. 55. С. 118–121.
5. Леднев М.А., Шашкова Э.Г., Сатановский С.Г. Результаты натурных наблюдений за напряженно-деформируемым состоянием плотины Чарвакской ГЭС в строительный период // 3-е Науч.-техн. совещ. Гидропроекта по подведению итогов науч.-исслед. работ в обл. энерг. и водохоз. стр-ва за девятую пятилетку и рассмотрению задач десятой пятилетки: тезисы докл. и сообщ. Ч. 1. М., 1976. С. 112–114.
6. Турапин С.С., Савушкин С.С., Каштанов В.В. Эксплуатация гидротехнических сооружений мелиоративного комплекса Минсельхоза России // Экология и строительство. 2018. № 2. С. 19–26. DOI 10.24411/2413-8452-2018-10003.
7. Турапин С.С., Ольгаренко Г.В. Методические рекомендации по правилам эксплуатации мелиоративных систем и отдельно расположенных гидротехнических сооружений. Коломна: ИП Воробьев О.М., 2015. 68 с.
8. Сидоренко Д.А., Качаев А.Е. BIM-технологии в строительстве: что будет дальше? // Новые технологии в учебном процессе и производстве: материалы XXI Международной научно-технической конференции, посвященной 35-летию полета орбитального корабля-ракетоплана многоразовой транспортной космической системы «Буран», Рязань, 12–14 апреля 2023 г. / Под ред. А.Н. Паршина. Рязань: Рязанский институт (филиал) ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», 2023. С. 490–492.
9. Хитров Я.И., Качаев А.Е. Использование BIM-технологий для объекта промышленного назначения при реконструкции одного из его действующих производств // New Technologies. Science, Engineering, Pedagogics: материалы Всероссийской научно-практической конференции «Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference». М.: Московский Политех, 2024. С. 293–298.
10. Сорока В.В., Качаев А.Е. Информационное моделирование зданий и сооружений как инструмент снижения рисков инвестиционного строительства // Вестник Коломенского института (филиала) Московского политехнического университета: сборник научных трудов. М.: Московский политехнический университет, 2024. С. 341–346.
11. Muskat M. The Seepage of Water Through Dams with Vertical Faces // Physics. 1935. Vol. 6. Issue 12. Pp. 402–415. DOI: 10.1063/1.1745284.
12. Шестаков В.М. Некоторые вопросы моделирования неустановившейся фильтрации // Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений. 1956. № 2. С. 78–82.
13. Aniskin N.A., Antonov A.S. Development geo-seepage models for solving seepage problems of large dam's foundations, on an example of ANSYS Mechanical APDL // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1079–1080. Pp. 198–201.
14. Шестаков В.М. Фильтрационный расчет земляных плотин и перемычек при колебании бьефов // Гидротехническое строительство. 1953. № 7. С. 36–39.
15. Reinius E. The stability of the upstream slope of earth dams. Stockholm, 1948. 120 p.
16. Aniskin N.A., Sergeev S.A. Stability of the slope of an earth dam during reservoir depletion. Construction: science and education. 2022. Vol. 12. Issue. 3. Article. 1. Pp. 6–17. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.3.1.
17. Nikitin V.M. Long-term forecast of settlements of rockfill dams. Proceedings of the Tashkent Institute of Irrigation and Mechanization of Agriculture. 1973. Issue 55. Pp. 118–121.
18. Lednev M.A., Shashkova E.G., Satanovsky S.G. Results of in-kind observations of the stress-strain state of the Charvak hydroelectric power station dam during the construction // In the Proc. 3rd Scientific and Technical Conference of Hydroproject on summing up the results of scientific research in the field of energy and water management construction for the ninth five-year plan and consideration of the tasks of the tenth five-year plan. 1976. Abstracts of reports and communications. Vol. 1. Moscow, 1976. Pp. 112–114.
19. Turapin S.S., Savushkin S.S., Kashtanov V.V. Operation of hydraulic structures of the melioration complex of the Ministry of Agriculture of Russia. Ecology and Construction. 2018. No. 2. Pp. 19–26. DOI 10.24411/2413-8452-2018-10003. (rus)
20. Turapin S.S., Olgarenko G.V. Methodical recommendations on the rules for the operation of melioration systems and separately located hydraulic structures. Kolomna: IP Vorobyov O.M., 2015. 68 p.
21. Sidorenko D.A., Kachaev A.E. BIM technologies in construction: what will happen next? Ryazan: Ryazan Institute (branch) of the FSAEI of Higher Education «Moscow Polytechnic University», 2023. Pp. 490–492.
22. Khitrov Ya.I., Kachaev A.E. Use of BIM technologies for an industrial facility during the reconstruction of one of its existing production facilities // New Technologies. Science, Engineering, Pedagogics: Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference. Moscow: Moscow Polytechnic University, 2024. Pp. 293–298.
23. Soroka V.V., Kachaev A.E. Information modeling of buildings and structures as a tool for reducing the risks of investment construction. Bulletin of the Kolomna Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University: Collection of scientific papers. Moscow: Moscow Polytechnic University, 2024. Pp. 341–346.
24. Muskat M. The Seepage of Water Through Dams with Vertical Faces // Physics. 1935. Vol. 6. Issue 12. Pp. 402–415. DOI: 10.1063/1.1745284.
25. Shestakov V.M. Some issues of modeling unsteady filtration. Issues of filtration calculations of hydraulic structures. 1956. No. 2. Pp. 78–82.
26. Aniskin N.A., Antonov A.S. Development geo-seepage models for solving seepage problems of large dam's foundations, on an example of ANSYS Mechanical APDL // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1079–1080. Pp. 198–201.
27. Shestakov V.M. Filtration calculation of earth dams and cofferdams with fluctuating pools. Hydrotechnical construction. 1953. No. 7. Pp. 36–39.

Качаев Александр Евгеньевич, канд. техн. наук, зав. кафедрой строительного производства, doctor_cement@mail.ru (Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета); науч. сотрудник отдела водоснабжения (ВНИИ систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», г. Коломна); **Турапин Сергей Сергеевич**, канд. техн. наук, врио директора, pgraduga@yandex.ru (ВНИИ систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», г. Коломна).

REFERENCES

УДК 626.826

DOI: 10.32962/0235-2524-2025-1-12-17

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОПРОВОДЯЩЕЙ СЕТИ КАНАЛОВ И СООРУЖЕНИЙ РЕСПУБЛИКИ КАЛМЫКИЯ

В.Ф. ТАЛАЛАЕВА, О.А. БАЕВ, А.В. КОЛГАНОВ

Ключевые слова: техническое состояние, гидравлический расчет, канал, гидротехническое сооружение, реконструкция, оросительная система, обследование, фильтрация.

Keywords: hydraulic calculations, canal, reconstruction, irrigation system, surveys, filtration, water resistance.

Аннотация. Цель работы: оценка технического состояния и определение гидравлических характеристик каналов различного порядка водопроводящей сети Сарпинской и Черноземельской обводнительно-оросительных систем с учетом их современного состояния. По результатам натурных исследований установлено, что основные магистральные