

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 551.577:631.6

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-107-124

Технология аккумуляирования стока подземных вод для расширения мелиоративных систем

Владимир Георгиевич Дегтярев¹, Анна Евгеньевна Хаджиди²,
Георгий Владимирович Дегтярев³, Евгений Владимирович Кузнецов⁴

^{1, 2, 3, 4}Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина,
Краснодар, Российская Федерация

¹cst2007@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1993-6736>

²dtn-khanna@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1375-9548>

³degtyarev.g.v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1451-4489>

⁴dtn-kuz@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0524-8390>

Аннотация. **Цель:** разработка технологии аккумуляирования стока подземных вод с учетом реологических свойств грунта в системе аккумуляирования атмосферных осадков для расширения мелиоративных систем. **Материалы и методы.** При помощи подземной плотины создаются условия для аккумуляирования стока подземных вод с учетом реологических свойств грунта в системе аккумуляирования атмосферных осадков для расширения мелиоративных систем. Исследования выполнены с применением программного комплекса midas GTS NX. Математическое моделирование выполнено в программном комплексе wxMaxima. **Результаты.** Разработан комплекс технических устройств, объединенных в технологическую систему, предназначенный для обеспечения надежного накопления стока атмосферных осадков в осенне-зимний период и водоотбора в требуемом объеме, в т. ч. и в маловодные периоды года, в долинах горных рек с периодически пересыхающим водотоком. Технологическая схема включает устройство водонепроницаемой подземной плотины в поперечном створе долины реки, полностью по мощности и ширине перекрывающей водоносный горизонт и образующей основное подземное водохранилище. Получены закономерности напряженно-деформированного состояния грунтового массива во времени под действием нагрузок, в т. ч. гидростатических, при уровнях воды в верхнем бьефе в диапазоне от минус 8,19 до минус 1,18 м и уровнях воды в нижнем бьефе от минус 7,93 до минус 6,68 м. Установлено, что перемещение основания подземной плотины зависит от напора в верхнем бьефе плотины: чем больше напор, тем больше перемещение ее основания, а при увеличении напора в 4 раза перемещение основания увеличивается в 5,5 раза. **Выводы.** Предложенная технология аккумуляирования стока подземных вод в условиях дефицита водных ресурсов, основанная на системе регулирования подземной плотиной с подъемно-транспортным оборудованием, предназначена для гарантированного накопления природных вод и использования их на гидромелиоративных системах.

Ключевые слова: подземный и надземный сток, дефицит, аккумуляирование стока, технология, плотина, бьеф

Для цитирования: Технология аккумуляирования стока подземных вод для расширения мелиоративных систем / В. Г. Дегтярев, А. Е. Хаджиди, Г. В. Дегтярев, Е. В. Кузнецов // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 3. С. 107–124. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-107-124>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Groundwater flow accumulation technology for expanding reclamation systems

Vladimir G. Degtyarev¹, Anna E. Khadzhidi², Georgy V. Degtyarev³,
Evgeny V. Kuznetsov⁴

^{1,2,3,4}Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation

¹cst2007@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1993-6736>

²dtn-khanna@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1375-9548>

³degtyarev.g.v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1451-4489>

⁴dtn-kuz@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0524-8390>

Abstract. Purpose: to develop the technology for accumulating groundwater flow, taking into account the rheological soil properties in the system of accumulating precipitation for expanding reclamation systems. **Materials and methods.** With the help of an underground dam, the conditions for accumulating groundwater flow are created, taking into account the rheological soil properties in the system of accumulating precipitation for expanding reclamation systems. The studies were performed using the midas GTS NX software package. Mathematical modeling was performed in the wxMaxima software package. **Results.** A set of technical devices combined into a technological system, intended for ensuring reliable accumulation of precipitation flow in the autumn-winter period and water withdrawal in the required volume, including dry periods of the year, in mountain river valleys with periodically intermittent watercourse has been developed. The technological scheme includes the construction of an impermeable underground dam in the cross section of the river valley, completely covering the aquifer in terms of power and width and forming the main underground reservoir. The regularities of the stress-strain state of the soil mass in time under the loads, including hydrostatic ones, are obtained at upstream water levels in the range from minus 8.19 to minus 1.18 m and downstream water levels from minus 7.93 to minus 6.68 m. It has been determined that the displacement of the underground dam foundation depends on pressure in the upstream of dam: the greater the pressure, the greater the displacement of its foundation, and with an increase in pressure by 4 times, the displacement of the foundation increases by 5.5 times. **Conclusions.** The proposed technology of groundwater flow accumulation under conditions of water resources deficit, based on the system of regulation of an underground dam with lifting and transport equipment, is designed to guarantee the accumulation of natural waters and their use in irrigation systems.

Keywords: groundwater and aboveground flow, deficit, flow accumulation, technology, dam, stream

For citation: Degtyarev V. G., Khadzhidi A. E., Degtyarev G. V., Kuznetsov E. V. Groundwater flow accumulation technology for expanding reclamation systems. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(3):107–124. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-107-124>.

Введение. Сельскохозяйственное развитие региона должно обеспечиваться наличием основных ресурсов, к которым можно отнести пригодные земли, водные ресурсы, электрическую энергию и трудовые ресурсы. Отсутствие любого из факторов либо сделает вообще невозможным разви-

тие, либо значительно снизит показатели эффективности. В такой ситуации находится часть регионов Черноморского побережья Северного Кавказа, когда имеются в доступности все ресурсы, кроме пресной воды [1, 2]. Дефицит пресной воды негативно сказывается на развитии отраслей сельского хозяйства: мелиорации, виноградарства, садоводства, производства овощей и др. Без достаточных объемов пресной воды практически невозможно строительство новых оросительных систем капельного и внутрипочвенного орошения, эффективная эксплуатация уже введенных площадей орошения, и при дефиците водных ресурсов невозможно производить качественную продукцию, перерабатывать ее [3].

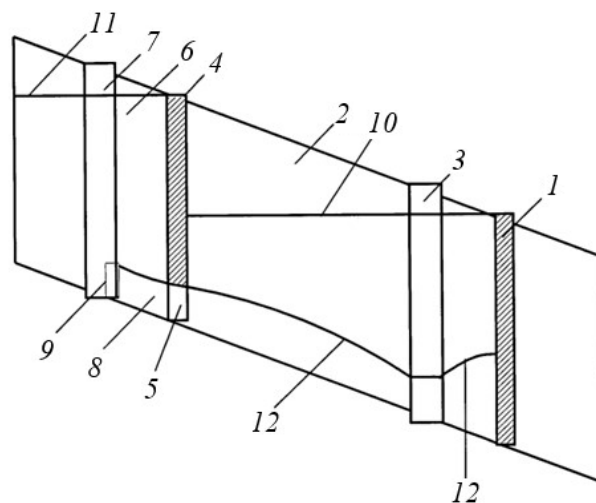
Существующие доступные ресурсы пресной воды надземного и подземного стока на Северном Кавказе практически все разведаны, зарегулированы и поставлены на службу человеку. Дальнейшая интенсификация использования, например, открытых водотоков, даже больших рек, может привести к их деградации и экологической катастрофе.

Вместе с тем учеными найден не используемый в полном объеме до настоящего времени источник пресной воды, и это атмосферные осадки [4]. Так, например, атмосферных осадков на Черноморском побережье Северного Кавказа, в общем, выпадает в 6 раз больше, чем потребляется в целом данного ресурса. Но вся проблема в том, что осадки выпадают крайне неравномерно, и в основном в осенне-зимний период, т. е. тогда, когда потребность в них минимальна. При этом атмосферные осадки в рассматриваемом регионе практически мгновенно переходят в разряд подземных вод, так как аллювиально-делювиальный грунт, формирующий поверхность «старых» Кавказских гор, хорошо фильтрует воду, не образуя поверхностных стоков [5]. В свою очередь подземный сток в конечном итоге стремится в акваторию Черного моря, где и теряется для региона безвозвратно. Поэтому целью исследований является разработка технологии аккумуляции стока подземных вод с учетом реологических

свойств грунта в системе аккумуляирования атмосферных осадков для расширения мелиоративных систем.

Материалы и методы. Разработаны технологии аккумуляирования стока подземных вод, базирующиеся на системах регулирования, включающих прежде всего подземную плотину и подъемно-транспортное оборудование, а также запорно-регулирующую арматуру. Технологии нацелены на водоснабжение, в т. ч. для мелиоративных нужд. Решается вопрос формирования объемов воды при регулировании подземного стока водоносных горизонтов, приуроченных к долинам горных рек с периодически пересыхающим водотоком. Именно в такой постановке вопроса обеспечивается повышение надежности водоотбора или, как правило, даже его увеличение [6]. Технологическая схема прежде всего включает устройство водонепроницаемой подземной плотины 1 в поперечном створе долины реки, полностью по мощности и ширине перекрывающей водоносный горизонт и образующей основное подземное водохранилище 2. Выше подземной плотины расположен водозабор подземных вод, который может быть представлен или кустом скважин, или шахтным колодцем 3. Реализация технологии предусматривает также устройство дополнительной водонепроницаемой плотины 4, расположенной в поперечном створе долины реки выше зоны влияния основного подземного водохранилища 2 в верхнем его бьефе. В результате такого расположения плотины образуется дополнительное подземное водохранилище 6. Дополнительная водонепроницаемая плотина 4 имеет отверстие 5 для пропуска подземных вод из дополнительного подземного водохранилища 6. В верхнем бьефе дополнительной водонепроницаемой плотины 4 устанавливается водоприемное устройство, например, куст свай 7, сообщающийся посредством трубопровода 8 с основным подземным водохранилищем 2 через отверстие 5. Трубопровод 8 оснащен размещенным у куста свай 7 затвором 9 для регулирования расхода воды из водоприемного устройства 7 в основное подземное водохранилище 2.

Представленный комплекс технических устройств, объединенных в технологическую систему, обеспечит возможность надежного аккумулярования стока атмосферных осадков в осенне-зимний период и водоотбора в требуемом объеме на протяжении всего периода эксплуатации подземных водохранилищ, в т. ч. и в маловодные периоды года, в долинах горных рек с периодически пересыхающим водотоком. На рисунке 1 представлена технологическая схема устройства, обеспечивающего регулирование стока атмосферных осадков посредством подземных водохранилищ.



- 1 – водонепроницаемая подземная плотина; 2 – водохранилище; 3 – шахтный колодец;
4 – водонепроницаемая плотина; 5 – отверстие для пропуска подземных вод;
6 – дополнительное подземное водохранилище; 7 – сваи; 8 – трубопровод;
9 – затвор; 10 – уровень нижнего бьефа; 11 – уровень верхнего бьефа;
12 – пьезометрическая линия

- 1 – impermeable underground dam; 2 – reservoir; 3 – mine well; 4 – impermeable dam;
5 – port for the groundwater passage; 6 – additional underground reservoir; 7 – piles;
8 – pipeline; 9 – gate; 10 – downstream level; 11 – upstream level; 12 – piezometric line

**Рисунок 1 – Технологическая схема устройства,
обеспечивающего регулирование стока атмосферных
осадков посредством подземных водохранилищ**

**Figure 1 – Technological scheme of the device, providing atmospheric
precipitation flow regulation through underground reservoirs**

Анализ технологической схемы устройства, обеспечивающего регулирование стока атмосферных осадков посредством подземных водохранилищ, позволяет констатировать, что наиболее неизученным компонентом системы в новой перспективной технологии является работа подзем-

ной плотины. До настоящего времени, в связи с практическим неиспользованием стены в грунте в качестве подземной плотины, нет практически никаких комплексных исследований параметров и режимов работы стены в грунте в качестве подземной плотины. В представленном материале реализовано максимально приближенное к реальному Мязыбрь-Адербскому месторождению природных вод Краснодарского края численное моделирование объекта при расположении на нем стены в грунте и формировании управляемого в режимах подземного водохранилища. Исследование выполнено с применением программного комплекса midas GTS NX. В рамках данной работы осуществлялись моделирование и анализ грунтового массива и подземной плотины при различных уровнях воды, воздействующих со стороны верхнего и нижнего бьефов. Учет реологических свойств грунта выполнен посредством совмещенного стадийного моделирования в рамках расчетного случая, учитывающего изменчивость напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового массива и фильтрацию.

Результаты. Изменение уровня воды в верхнем бьефе (УВБ) рассматривалось в диапазоне от минус 8,19 до минус 1,18 м, в нижнем бьефе (УНБ) от минус 7,93 до минус 6,68 м.

В результате исследования выявлены закономерности НДС грунтового массива во времени под действием нагрузок, в т. ч. гидростатических. Принципиальная схема объекта исследования представлена на рисунке 2.

Расчетная модель, разработанная в программе midas GTS NX, представлена на рисунке 3.

Результаты численного исследования системы аккумуляции стока атмосферных осадков с целью анализа НДС грунтового массива и подземной плотины в рамках совмещенного расчета «фильтрация – НДС» приведены в таблице 1. Численный массив, полученный в результате расчетов, вследствие комбинаций с аргументами равен 97 позициям и приведен в таблице 1 в сокращенном виде.

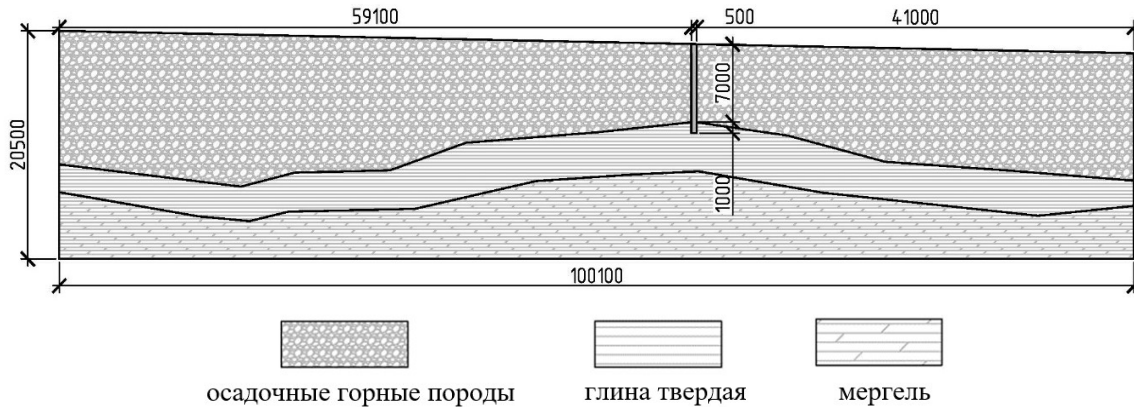


Рисунок 2 – Принципиальная схема объекта исследования
Figure 2 – Schematic diagram of the object of study

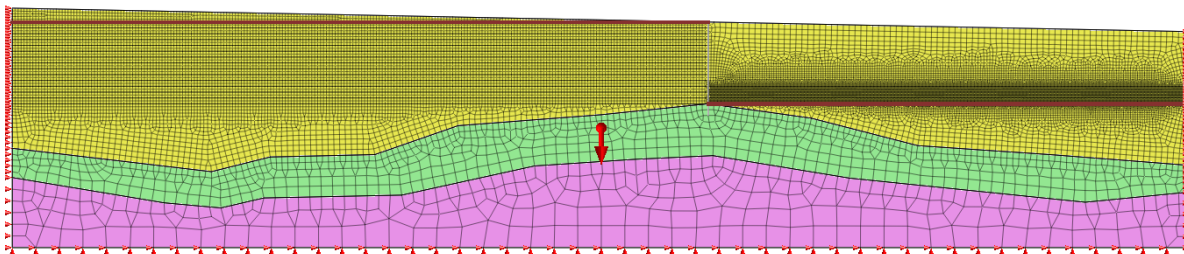


Рисунок 3 – Расчетная модель объекта исследования
Figure 3 – Calculation model of the object of study

Таблица 1 – Результаты численного исследования перемещений основания подземной плотины в системе аккумуляции стока атмосферных осадков

Table 1 – Results of a numerical study of the displacement of the underground dam foundation in the system of accumulating the atmospheric precipitation flow

Исследуемая комбинация	УВБ, м	УНБ, м	Перемещение основания подземной плотины, мм
1	-8,19	-7,93	0,6719
2	-8,19	-7,68	1,1704
3	-8,19	-7,43	1,6753
4	-8,19	-7,18	2,1662
5	-8,19	-6,94	2,6809
6	-8,19	-6,68	3,2217
7	-7,19	-8,19	2,4472
8	-7,19	-7,93	2,8429
9	-7,19	-7,68	3,2667
10	-7,19	-7,43	3,7209
11	-7,19	-7,19	4,1751
12	-7,19	-6,94	4,6539
13	-7,19	-6,68	5,1596
14	-6,68	-8,19	3,6321
15	-6,68	-7,93	4,0161

Визуализированные результаты численного исследования перемещений основания подземной плотины в системе аккумуляции стока атмосферных осадков приведены на рисунке 4.

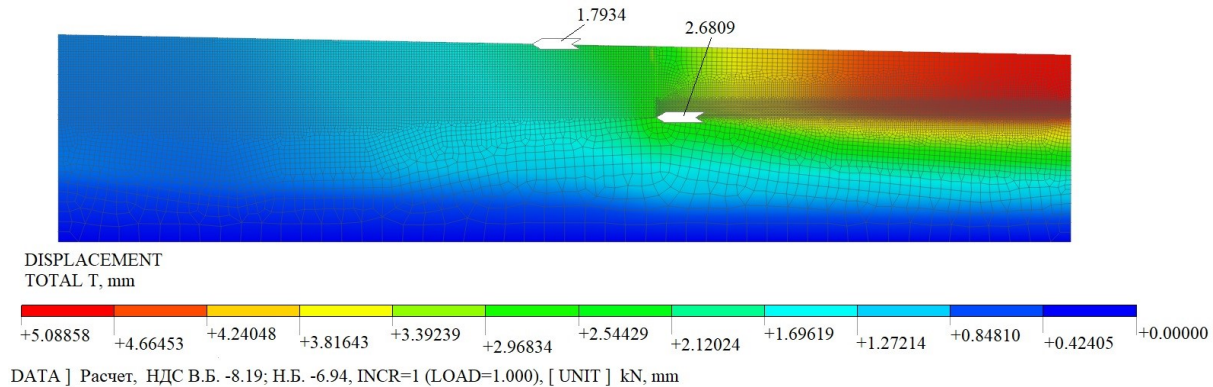


Рисунок 4 – Визуализированные результаты численного исследования перемещений основания подземной плотины

Figure 4 – Visualized results of numerical study of displacement of the underground dam foundation

Обработка и анализ полученного большого массива цифр, хранящих информацию о рассматриваемом процессе, наиболее эффективны при применении математического моделирования [7, 8]. Для разработки математической модели использован комплекс wxMaxima, хорошо зарекомендовавший себя в работах, подобных рассматриваемой [9–11], что в свою очередь признается нами как действие, завершившее процесс верификации примененной программы.

Алгоритм работы в ПО wxMaxima прежде всего предусматривает представление массива цифр в матричном виде. Сокращенный фрагмент матрицы по результатам расчета перемещения основания подземной плотины имеет следующий вид:

M:matrix ([−8.19, −7.93, 0.6719], [−8.19, −7.68, 1.1704], [−8.19, −7.43, 1.6753], [−8.19, −7.18, 2.1662], [−8.19, −6.94, 2.6809], [−8.19, −6.68, 3.2217], [−7.19, −8.19, 2.4472], [−7.19, −7.93, 2.8429], [−7.19, −7.68, 3.2667], [−7.19, −7.43, 3.7209], [−7.19, −7.19, 4.1751], [−7.19, −6.94, 4.6539], [−7.19, −6.68, 5.1596], [−6.68, −8.19, 3.6321], [−6.68, −7.93, 4.0161], [−6.68, −7.68, 4.4246],

[−6.68, −7.43, 4.8652], [−6.68, −7.19, 5.3082], [−6.68, −6.94, 5.7860], [−6.68, −6.68, 6.2903], [−6.18, −8.19, 4.8100], [−6.18, −7.93, 5.1835], [−6.18, −7.68, 5.5803], [−6.18, −7.43, 6.0114], [−6.18, −7.19, 6.4442], [−6.18, −6.94, 6.9162], [−6.18, −6.68, 7.4177], [−5.68, −8.19, 5.9938], [−5.68, −7.93, 6.3579], [−5.68, −7.68, 6.7466], [−5.68, −7.43, 7.1709], ...

Осуществив выбор программы для создания математической модели, также обратили внимание на структурно подобную обработку результатов численных данных в указанных ранее работах, где использовано представление математической модели в виде полинома второй степени, что в ПО wxMaxima выполняется посредством нижеследующего файла: `lsquares_estimates (M, [x, y, z], Z = a + b*x + c*y + d*x*y + e*x^2 + f*y^2)`, где a, b, c, d, e, f – коэффициенты в математической модели перемещения основания подземной плотины с учетом реологических свойств грунта.

Реализовав файл, получили следующие коэффициенты, приведенные в натуральных дробях:

$$a = 17443401/419075, b = 315260/167630, c = 72687/16763, \\ d = -39408/670521, e = 5218/1676303, f = 16510/83815.$$

Для представления в математической модели коэффициенты переведены в вид десятичных дробей при использовании файла `float(%)`. В свою очередь все коэффициенты модели прошли проверку на значимость, а сама модель на адекватность при использовании файла: `lsquares_residuals M, [x, y, z], Z = a + b*x + c*y + d*x*y + e*x^2 + f*y^2, first(s)`.

В окончательном виде имеем следующую модель:

$$Z = 41,62348 + 1,88069x + 4,33618y - 0,05877xy + 0,00311x^2 + 0,19698y^2.$$

Доказанная адекватность математической модели предполагает правомочность ее визуализации, что реализуется посредством файла `plot3d`, а результат представлен на рисунке 5.

Анализ визуализированной математической модели перемещения основания подземной плотины с учетом реологических свойств грунта или

функции отклика позволяет констатировать, что в диапазоне изменения УНБ от минус 6 до минус 8 м, а также УВБ от минус 2 до минус 8 м значение перемещения теоретически может изменяться от 0 до 20 мм.

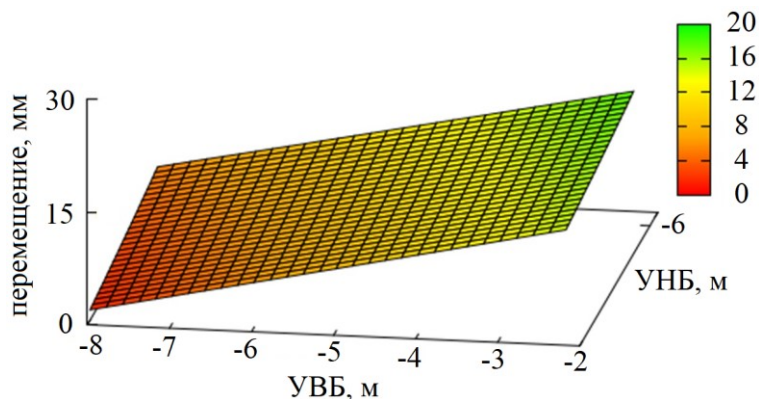


Рисунок 5 – Визуализированная математическая модель перемещения основания подземной плотины с учетом реологических свойств грунта

Figure 5 – Visualized mathematical model of the displacement of the underground dam foundation, taking into account the rheological soil properties

Алгоритм исследования и анализа как визуализированной, так и самой математической модели перемещения основания подземной плотины с учетом реологических свойств грунта предполагает прежде всего получение графиков линий равных уровней по полученной поверхности отклика. Данное действие реализуется посредством файла `contour_plot`, а результат представлен на рисунке 6.

Анализ графиков линий равных уровней по функции отклика позволяет констатировать, что в диапазоне изменения УНБ от минус 6 до минус 8 м функция отклика имеет экстремальные значения, подлежащие уточнению далее, во всем диапазоне изменения УВБ. При изменении УВБ от минус 2 до минус 8 м значения перемещений незначительно превышают 15 мм, а также могут быть несколько менее 5 мм.

Более детализированный анализ математической модели перемещения основания подземной плотины предполагает построение сечений по линиям равных уровней при постановке аргументов вначале одного, а затем

другого на постоянные уровни, что реализуется посредством файла plot 2d ($[F_1(x), F_2(x), F_3(x)]$).

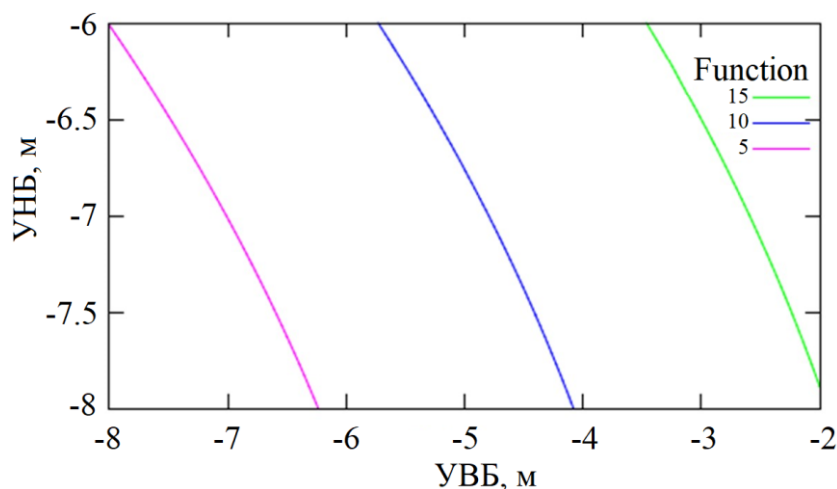


Рисунок 6 – Линии равных уровней по визуализированной математической модели перемещения основания подземной плотины с учетом реологических свойств грунта

Figure 6 – Lines of equal levels by the visualized mathematical model of the underground dam foundation displacement taking into account the rheological soil properties

Рассмотрим постановку в математической модели УВБ на следующие постоянные уровни: $F_1(-0.5, y)$; $F_2(-4, y)$; $F_3(-8, y)$, что завершится преобразованием модели к видам:

$$F_1(x) = 0,19698x^2 + 4,365565x + 40,6839125,$$

$$F_2(x) = 0,19698x^2 + 4,57126x + 34,15048,$$

$$F_3(x) = 0,19698x^2 + 4,80634x + 26,777.$$

Графики сечений поверхности отклика при указанных постоянных параметрах УВБ представлены на рисунке 7.

Анализ уравнений и графиков, представленных на рисунке 7, позволяет констатировать, что в диапазоне изменения УНБ от минус 6 до минус 8 м перемещение основания подземной плотины с учетом реологических свойств грунта не достигает экстремальных значений и увеличивается как при увеличении УНБ, так и при увеличении УВБ. Значения перемещений основания плотины по граничным параметрам УНБ сведены в таблицу 2.

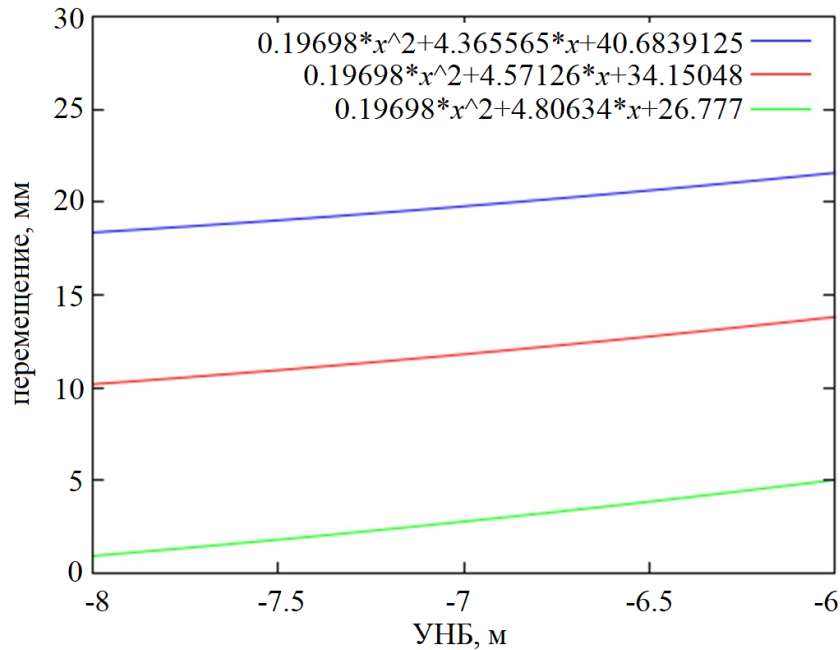


Рисунок 7 – Сечения по поверхности отклика при постоянных параметрах уровня верхнего бьефа
Figure 7 – Sections along the response surface at constant upstream level parameters

Таблица 2 – Перемещения основания плотины по граничным параметрам уровня нижнего бьефа
Table 2 – Displacement of the dam foundation along the boundary parameters of the downstream level

УВБ, м	УНБ, м	Перемещение основания плотины, мм
-0,5	-6	21,60
	-7	19,74
	-8	18,43
-4,0	-6	13,87
	-7	11,91
	-8	10,23
-8,0	-6	5,11
	-7	2,78
	-8	0,82

Рассмотрим постановку в математической модели УНБ на следующие постоянные уровни: $F_1(x, -6)$; $F_2(x, -7)$; $F_3(x, -8)$, что завершится преобразованием модели к видам:

$$F_1(x) = 0,00311x^2 + 2,23331x + 22,69768,$$

$$F_2(x) = 0,00311x^2 + 2,29208x + 20,92224,$$

$$F_3(x) = 0,00311x^2 + 2,35085x + 19,54076.$$

Графики сечений поверхности отклика при указанных постоянных параметрах УНБ представлены на рисунке 8.

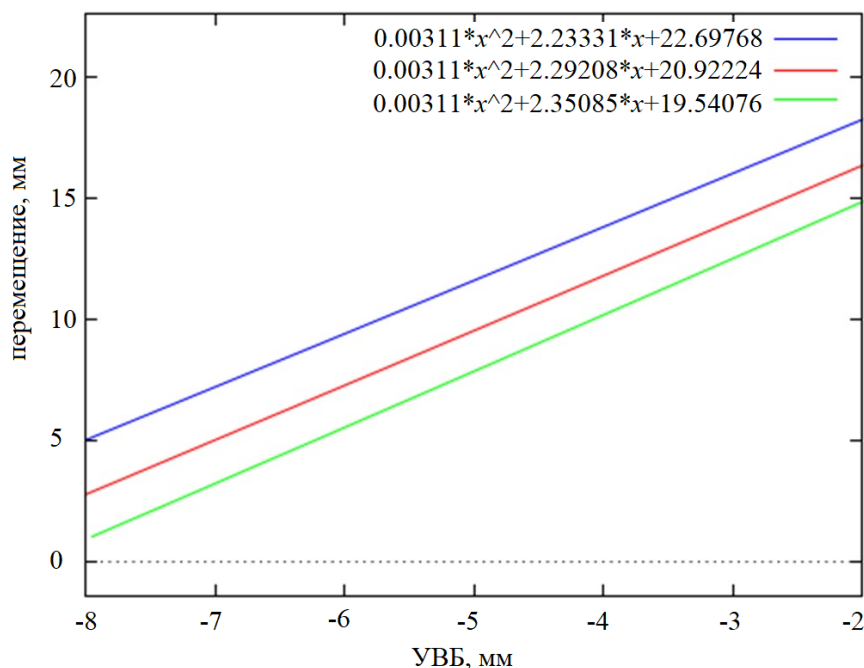


Рисунок 8 – Сечения по поверхности отклика при постоянных параметрах уровня нижнего бьефа
Figure 8 – Sections along the response surface at constant downstream level parameters

Анализ уравнений и графиков, представленных на рисунке 8, позволяет констатировать, что в диапазоне изменения УВБ от минус 2 до минус 8 м перемещение основания подземной плотины с учетом реологических свойств грунта изменяется линейно.

Значения перемещений основания плотины по граничным параметрам УВБ и при постоянных параметрах УНБ сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Перемещения основания плотины по граничным параметрам уровня верхнего бьефа

Table 3 – Dam foundation displacement along the boundary parameters of the upstream level

УНБ, м	УВБ, м	Перемещение основания плотины, мм
1	2	3
-6,0	-2	18,27
	-5	11,48
	-8	5,01

Продолжение таблицы 3

Table 3 continued

1	2	3
-7,0	-2	16,34
	-5	9,48
	-8	2,77
-8,0	-2	14,78
	-5	7,77
	-8	0,98

Анализ данных таблицы 3 позволяет сделать вывод, что при максимальном напоре в верхнем бьефе плотины имеем значения перемещения основания плотины, отличающиеся друг от друга максимум на 19,1 %, во всем диапазоне изменения уровней воды в нижнем бьефе. При средних значениях напора в верхнем бьефе плотины имеем значения перемещения основания плотины, отличающиеся друг от друга на 32,3 %, во всем диапазоне изменения уровней воды в нижнем бьефе. При минимальном напоре в верхнем бьефе плотины имеем отличающиеся друг от друга уже на 80,4 % значения перемещения основания плотины во всем диапазоне изменения уровней воды в нижнем бьефе.

Выводы. При достижении УВБ постоянного уровня экстремальные значения перемещений будут нижеследующими: для $F_1(-0,5 \text{ м})$ максимальное перемещение составляет 21,62 мм, при $F_2(-4 \text{ м})$ максимальное перемещение составляет 13,79 мм, для $F_3(-8 \text{ м})$ максимальное перемещение составляет 5,03 мм, при этом все эти локальные максимумы достигаются при УНБ, равном минус 6,0 м. В свою очередь экстремальные значения перемещений по минимуму будут нижеследующими: для $F_1(-0,5 \text{ м})$ имеем 18,36 мм, для $F_2(-4 \text{ м})$ имеем 10,25 мм, а для $F_3(-8 \text{ м})$ имеем 0,93 мм, при этом все эти локальные минимумы достигаются при УНБ, равном минус 8,0 м.

Таким образом, чем больше напор в верхнем бьефе плотины, тем больше перемещение ее основания, и при увеличении напора в 16 раз перемещение основания увеличивается в 19,7 раза.

При постановке УНБ на постоянные уровни экстремальные значения перемещений будут нижеследующими: для $F_1(-6 \text{ м})$ максимальное перемещение составляет 18,2 мм, при $F_2(-4 \text{ м})$ максимальное перемещение составляет 16,34 мм, для $F_3(-8 \text{ м})$ максимальное перемещение составляет 14,92 мм, при этом все эти локальные максимумы достигаются при УВБ, равном минус 2,0 м. В свою очередь экстремальные значения перемещений по минимуму будут нижеследующими: для $F_1(-6 \text{ м})$ имеем 5,01 мм, для $F_2(-7 \text{ м})$ имеем 2,77 мм, а для $F_3(-8 \text{ м})$ имеем 0,91 мм, при этом все эти локальные минимумы достигаются при УВБ, равном минус 8,0 м.

Таким образом, чем больше напор в верхнем бьефе плотины, тем больше перемещение ее основания, и при увеличении напора в 4 раза перемещение основания увеличивается в 5,5 раза.

Разработанная и исследованная технология аккумулярования стока подземных вод в условиях дефицита стока, основанная на системе регулирования при помощи подземной плотины и подъемно-транспортного оборудования, расширит орошаемые площади и позволит получать гарантированные урожаи сельскохозяйственных культур.

Список источников

1. Сафронова Т. И., Дегтярева О. Г. Вероятностный метод анализа риска при обосновании эксплуатационных режимов системы регулирования стока атмосферных осадков // Международный сельскохозяйственный журнал. 2019. № 6. С. 31–35. DOI: 10.24411/2587-6740-2019-16100.
2. Ильинич В. В., Кузнецова Е. В., Перминов А. В. Подход к регулированию стока водохранилищем для снижения риска превышения его противопаводковой емкости во время внезапных паводков // Гидротехническое строительство. 2022. № 10. С. 13–19. <http://dx.doi.org/10.34831/10.34831/EP.2022.13.99.002>.
3. Симонович О. С., Снежко В. Л., Козлов Д. В. Периодичность ремонта низконапорных грунтовых плотин для сохранения их уровня безопасности // Природообустройство. 2020. № 1. С. 59–65. DOI: 10.34677/1997-6011/2020-1-59-65.
4. Мешков В. В., Макарычев С. В. Мелиоративное и водохозяйственное использование водных ресурсов реки Алей и Гилевского водохранилища // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 7(213). С. 34–40.
5. Полуэктов Е. В., Балакай Г. Т. Эрозионные процессы при стоке талых вод на юге европейской части России // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2023. Т. 13, № 1. С. 1–18. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1337> (дата обращения: 01.05.2023). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-1-1-18>.

6. Проблема регулирования уровня озера Байкал / В. И. Зоркальцев, А. Д. Калихман, Т. П. Калихман, В. Н. Синюкович // Эко. 2022. Т. 52, № 8. С. 24–43. <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2022-8-24-43>.

7. Федорова О. И., Горшков В. Ю. Геоэлектрический мониторинг при диагностике насыпных гидротехнических сооружений на примере изучения грунтовой плотины // Гидротехническое строительство. 2022. № 11. С. 45–51. <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.82.30.006>.

8. Крылова А. И., Лаптева Н. А. Моделирование речного стока в бассейне реки Лены на основе гидрологически-корректной цифровой модели рельефа // Проблемы информатики. 2020. № 4(49). С. 71–84. DOI: 10.24411/2073-0667-2020-10016.

9. Абрамов Н. А. Методика оценки фильтрационной прочности грунтовых плотин // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева. 2022. Т. 304. С. 77–85.

10. Дегтярева О. Г., Найденов С. Ю., Дацьо Д. А. Исследование влияния гидродинамического давления на конструкции гидротехнических сооружений, расположенных в зоне повышенной сейсмической активности // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 8(65). С. 138–144.

11. Козлов Д. В. Безопасность и эксплуатационная работоспособность грунтовых плотин на водных объектах Московского региона // Гидротехника. 2021. № 1(62). С. 56–59.

References

1. Safronova T.I., Degtyareva O.G., 2019. *Veroyatnostnyy metod analiza riska pri obosnovanii ekspluatatsionnykh rezhimov sistemy regulirovaniya stoka atmosferynykh osadkov* [Probabilistic method of risk analysis in substantiating the operational modes of precipitation runoff control system]. *Mezhdunarodnyy sel'skokhozyaystvennyy zhurnal* [International Agricultural Journal], no. 6, pp. 31-35, DOI: 10.24411/2587-6740-2019-16100. (In Russian).

2. Ilyinich V.V., Kuznetsova E.V., Perminov A.V., 2022. *Podkhod k regulirovaniyu stoka vodokhranilishchem dlya snizheniya riska prevysheniya ego protivopavodkovoy emkosti vo vremya vnezapnykh pavodkov* [An approach to regulating the flow of a reservoir to reduce the risk of exceeding its flood storage capacity during flash floods]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 10, pp. 13-19, <http://dx.doi.org/10.34831/10.34831/EP.2022.13.99.002>. (In Russian).

3. Simonovich O.S., Snezhko V.L., Kozlov D.V., 2020. *Periodichnost' remonta nizkonapornykh gruntovykh plotin dlya sokhraneniya ikh urovnya bezopasnosti* [Periodicity of repair of low-pressure ground dams to maintain their safety level]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 1, pp. 59-65, DOI: 10.34677/1997-6011/2020-1-59-65. (In Russian).

4. Meshkov V.V., Makarychev S.V., 2022. *Meliorativnoe i vodokhozyaystvennoe ispol'zovanie vodnykh resursov reki Aley i Gilevskogo vodokhranilishcha* [Reclamation and water management use of water resources of the Alei River and the Gilevsky Reservoir]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agrarian University], no. 7(213), pp. 34-40. (In Russian).

5. Poluektov E.V., Balakay G.T., 2023. [Erosion processes during the melt water runoff in the south of the European part of Russia]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 13, no. 1, pp. 1-18, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1337> [accessed 01.05.2023], <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-1-1-18>. (In Russian).

6. Zorkaltsev V.I., Kalikhman A.D., Kalikhman T.P., Sinyukovich V.N., 2022. *Problema regulirovaniya urovnya ozera Baykal* [The problem of Lake Baikal level regulation]. *Eko* [Eko], vol. 52, no. 8, pp. 24-43, <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2022-8-24-43>. (In Russian).

7. Fedorova O.I., Gorshkov V.Yu., 2022. *Geoelektricheskiy monitoring pri diagnostike nasypanykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy na primere izucheniya gruntovoy plotiny* [Geoelectric monitoring of the bulk hydrotechnical structures on the example of studying an earth dam]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 11, pp. 45-51, <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.82.30.006>. (In Russian).

8. Krylova A.I., Lapteva N.A., 2020. *Modelirovanie rechnogo stoka v bassejne reki Leny na osnove gidrologicheskoi-korrektnoy tsifrovoy modeli rel'efa* [Modeling the stream flow in the Lena River basin on the basis of hydrologically correct digital elevation model]. *Problemy informatiki* [Problems of Informatics], no. 4(49), pp. 71-84, DOI: 10.24411/2073-0667-2020-10016. (In Russian).

9. Abramov N.A., 2022. *Metodika otsenki fil'tratsionnoy prochnosti gruntovykh plotin* [Methods for assessing the filtration strength of earthen dams]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva* [Bull. of Vedeneev VNIIG], vol. 304, pp. 77-85. (In Russian).

10. Degtyareva O.G., Naydenov S.Yu., Datsyo D.A., 2017. *Issledovanie vliyaniya gidrodinamicheskogo davleniya na konstruksii gidrotekhnicheskikh sooruzheniy, raspolozhennykh v zone povyshennoy seysmicheskoy aktivnosti* [Research influence of hydrodynamic pressure on construction of hydrotechnical buildings, located in area of seismic overactivity]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proc. of Kuban State Agrarian University], no. 8(65), pp. 138-144. (In Russian).

11. Kozlov D.V., 2021. *Bezopasnost' i ekspluatatsionnaya rabotosposobnost' gruntovykh plotin na vodnykh ob'ektakh Moskovskogo regiona* [Safety and operational efficiency of soil dams on water bodies of Moscow region]. *Gidrotekhnika* [Hydraulic Engineering], no. 1(62), pp. 56-59. (In Russian).

Информация об авторах

В. Г. Дегтярев – доцент кафедры гидравлики и сельскохозяйственного водоснабжения, кандидат технических наук;

А. Е. Хаджиди – профессор кафедры гидравлики и сельскохозяйственного водоснабжения, доктор технических наук, доцент;

Г. В. Дегтярев – заведующий кафедрой строительного производства, доктор технических наук, доцент;

Е. В. Кузнецов – заведующий кафедрой гидравлики и сельскохозяйственного водоснабжения, доктор технических наук, профессор.

Information about the authors

V. G. Degtyarev – Associate Professor of the Department of Hydraulics and Agricultural Water Supply, Candidate of Technical Sciences;

A. E. Khadzidi – Professor of the Department of Hydraulics and Agricultural Water Supply, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;

G. V. Degtyarev – Head of the Department of Construction Production, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;

E. V. Kuznetsov – Head of the Department of Hydraulics and Agricultural Water Supply, Doctor of Technical Sciences, Professor.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.05.2023; одобрена после рецензирования 26.06.2023; принята к публикации 05.07.2023.

The article was submitted 22.05.2023; approved after reviewing 26.06.2023; accepted for publication 05.07.2023.