

Рис. 1 Схема расположения пьезометров на Таналыкской плотине

были приняты отметки депрессионной кривой фильтрационного потока в теле плотины. Положение депрессионной кривой является одним из основных показателей (критериев) безопасности гидротехнических сооружений [4]. Грунтовая плотина оснащена контрольно-измерительной аппаратурой, состоящей из водомерного поста и 10 пьезометров (рис. 1).

Пьезометры П-1, П-2, П-4, П-6, П-8, П-9 расположены непосредственно на гребне плотины на отм. 364,5 м (БС), пьезометры П-3, П-5, П-7, П-10 расположены на берме низового откоса на отм. 357,0 м (БС).

Систематически во время исследований замерялись уровни воды в верхнем бьефе (ВБ) водохранилища и в пьезометрах. Уровни воды в ВБ определялись по стандартной методике, а в пьезометрах – методом «хлопушки». При этом полученные экспериментальные значения проверены на наличие или отсутствие выбросов – грубых ошибочных измерений, которые могут привести к неправильным выводам. Все результаты замеров выразили через показатели описательной статистики (таблица 1). Для статистической обработки данных натурных исследований использованы пакет анализа данных Excel и система обработки данных STATISTICA [8]. Анализ параметров описательной статистики показал, что средние уровни воды в пьезометрах, расположенных на гребне, выше тех, которые расположены на берме. Наименьшее среднее значение уровня воды имеет П-5, наибольшее – П-6. Коэффициенты вариации всех переменных находятся в пределах 0,40 – 0,77%, что делает результаты замеров пригодными для дальнейших анализов и построения моделей, асимметрия значений во всех замерах несущественная.

Результаты исследований. Результаты натурных фильтрационных исследований позволили установить количественную зави-

Таблица 1 – Результаты описательной статистики данных наблюдений уровня воды

Показатели	ВБ	П-1	П-2	П-3	П-4	П-5	П-6	П-7	П-8	П-9	П-10
Стандартная ошибка	0,46	0,38	0,38	0,26	0,40	0,24	0,36	0,25	0,37	0,36	0,23
Медиана	355,75	349,70	349,09	347,77	349,78	346,86	350,60	347,21	350,40	350,36	347,10
Мода	352,40	347,80	347,21	346,62	348,10	348,51	348,20	345,73	353,90	348,65	347,10
Среднее	355,86	350,22	349,66	347,87	350,69	347,19	351,00	347,42	350,36	350,22	347,22
Стандартное отклонение	2,73	2,26	2,22	1,54	2,35	1,41	2,13	1,50	2,19	2,10	1,37
Дисперсия выборки	7,47	5,13	4,92	2,39	5,54	2,00	4,54	2,24	4,79	4,43	1,89
Асимметричность	0,15	0,48	0,53	0,20	0,46	0,42	0,23	0,33	0,21	0,12	0,32
Интервал	7,90	6,82	6,86	4,68	7,19	4,35	6,67	4,59	6,85	6,25	4,15
Уровень надежности(95,0%)	0,94	0,78	0,76	0,53	0,81	0,49	0,73	0,51	0,75	0,72	0,47
Коэффициент вариации, %	0,77	0,65	0,63	0,44	0,67	0,41	0,61	0,43	0,62	0,60	0,40

симось значений уровней воды в пьезометрах от уровня воды в ВБ. Поскольку временные промежутки небольшие, и уровни ряда меняются слабо, то для установления зависимости применили метод корреляционно-регрессионного анализа. В данной работе построена модель парной зависимости уровня воды в пьезометре от уровня воды в ВБ по всем пьезометрам. Значения коэффициентов парной корреляции свидетельствуют о том, что теснота связи между уровнем воды в ВБ и уровнем воды в пьезометрах сильная по всем единицам наблюдения. Проверка уравнений по F-критерию (при табличном значении 4,17 и уровне значимости 0,05) показала статистическую значимость уравнений регрессии в целом и показателя тесноты связи, которые сформировались под неслучайным воздействием фактора. Параметры уравнений надежны и статистически значимы. Теснота связи между уровнями воды в ВБ и соответствующем пьезометре, которую характеризуют парные коэффициенты корреляции, сильнее в П-3 ($r_{xy} = 0,997$), слабее – в П-2 ($r_{xy} = 0,984$). Если принимать во внимание местоположение пьезометра (гребень или берма), то среди пьезометров, расположенных на гребне, наибольшую тесноту связи уровня

воды с уровнем воды в ВБ имеет П-6 ($r_{xy} = 0,996$), наименьшую – П-2 ($r_{xy} = 0,984$). Среди пьезометров, расположенных на берме, наибольшую тесноту связи уровня воды с уровнем воды в ВБ имеет П-3 ($r_{xy} = 0,997$), наименьшую – П-5 ($r_{xy} = 0,991$).

Статистический анализ обработки данных на компьютере позволил наглядно представить результаты исследований, описать динамику уровней фильтрационной воды для каждого пьезометра и получить экспериментальную математическую функцию напоров. Зависимости напоров воды в пьезометрах (h_n) от напора воды в ВБ (H_1) $h_n = f(H_1)$ хорошо аппроксимируются выражениями:

для гребня $h_n^{gp} = 0,801H_1 - 2,74;$ (1)

для бермы $h_n^{bep} = 0,530H_1 - 1,93;$ (2)

На практике часто возникает необходимость построения депрессионной кривой фильтрационного потока в теле грунтовых плотин [1; 3; 4], используя прогнозные математические модели. С целью создания такой модели сравнили отметки депрессионной кривой, полученные экспериментально и по расчетному методу. Сравнительный анализ показал, что результаты отличаются на 0,34 – 1,41 м (рис. 2).

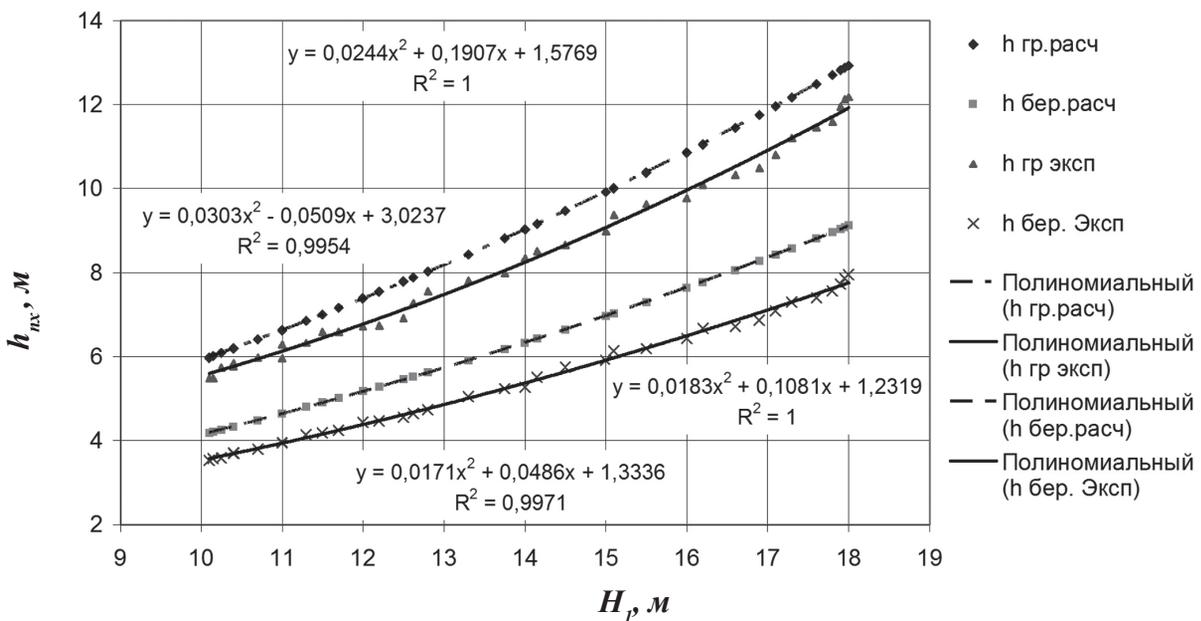


Рис. 2. Зависимость $h_{nx} = f(H_1)$

Отношение экспериментальных и расчетных отметок депрессионной кривой выражена через коэффициент эквивалентности

$$k_3 = \frac{x_1}{x_1'}$$

и аппроксимирована математической функцией:

$$k_3 = 0,9822 x_p^{0,1654}, \tag{3}$$

где x_{np} – приведенное расстояние от оси координат (УВВБ) до искомой точки в теле плотины, определяемое как $x_{np} = \frac{x}{L}$;

x – текущая координата искомой точки в теле плотины по оси абсцисс;

x_1' – та же координата, выраженная через экспериментальную математическую функцию напоров;

L – расстояние от оси координат (УВВБ) до точки входа кривой депрессии в дренаж по оси абсцисс.

Полученную зависимость (3) рекомендуется учитывать введением в расчетную модель [2] эквивалентного расстояния x_3 :

$$h_x = \sqrt{2 \frac{q}{k_T} (L - x_3) + h_c^2}, \tag{4}$$

где h_x – текущая координата кривой депрессии по оси ординат;

k_T – коэффициент фильтрации грунта тела плотины;

q и h_c – соответственно, удельный фильтрационный расход воды и координата кривой депрессии по оси ординат в точке входа в дренаж, определяемые по известным зависимостям;

x_3 – эквивалентное расстояние, определяемое по формуле:

$$x_3 = \frac{x}{k_3}. \tag{5}$$

Для сравнения значений, определенных по зависимости (4), с экспериментальными значениями пьезометрических напоров представлена зависимость $h_{nx} = f(H_1)$ для Таналыкского водохранилища (рис. 3).

Адекватность полученной зависимости подтверждается сопоставлением теоретических и эмпирических значений, расхождение которых не превосходит 5%

Установленные закономерности позволяют описывать фильтрационные процессы в теле грунтовых плотин водосбора р. Таналык и выполнять достоверные прогнозные расчеты депрессионной кривой.

Для построения депрессионной кривой в теле плотины в данной работе был использо-

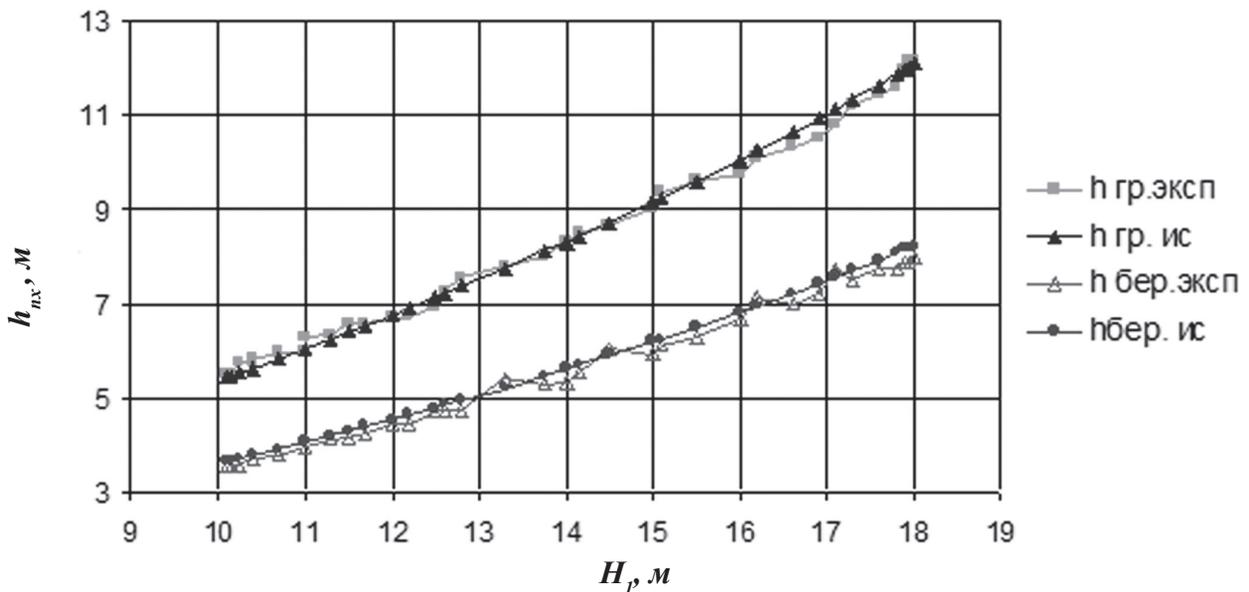


Рис. 3 Результирующая зависимость $h_{nx} = f(H_1)$ с учетом x_3

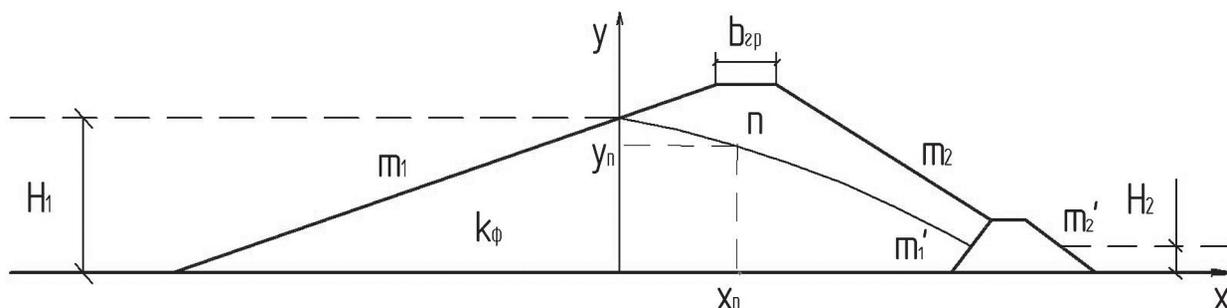


Рис. 4. Фрагмент грунтовой плотины с депрессионной кривой (при условии $H_2 > 0$).

ван программный пакет для математических и инженерных расчетов Mathcad 14.0. В целом, пакет Mathcad предоставляет средства для выполнения расчетных работ по моделированию различных систем, теории принятия оптимальных решений, разработки сценариев компьютерного сопровождения.

С помощью программного пакета Mathcad 14.0 проведены вычисления, включая решение системы дифференциальных уравнений с граничными условиями, на основе которого построена депрессионная кривая в теле грунтовой плотины. Кроме того, смоделированы контур плотины, дренажного банкета, уровни воды в верхнем и нижнем бьефе. При этом программа разрабатывалась для двух характерных вариантов когда уровень воды в нижнем бьефе $H_2 = 0$ и $H_2 > 0$.

Разработанная с использованием Mathcad 14.0 программа позволяет описывать фильтрационные процессы в теле грунтовых плотин и выполнять достоверные прогнозные расчеты положения депрессионной кривой.

Заключение. Таким образом, в результате проведенных исследований получены следующие выводы:

1. Выполнены экспериментальные исследования и получены реальные данные фильтрации воды через грунтовую плотину на примере Таналыкского водохранилища.

2. Представлены результаты описательной статистики и корреляционно-регрессивного анализа экспериментальных данных. Проверка уравнений по F-критерию показала статистическую значимость уравнений регрессии в целом и показателя тесноты связи.

3. Предложена методика построения депрессионных кривых в теле грунтовых плотин водохранилищ водосбора р. Таналык. При построении депрессионной кривой, используя существующие расчетные модели, рекомендуется вводить эквивалентное расстояние x_3 , определяемое через коэффициент эквивалентности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдрахманов Р.Ф. Водные ресурсы Башкортостана // Мелиорация и водное хозяйство. М.: 2004. № 3. С. 6–8.
2. Абдрахманов Р.Ф., Попов В.Г. Формирование минеральных вод Башкирского Предуралья // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. Уфа. 2011. № 4. С. 5–16.
3. Стефанишин Д.В. Шульман С.Г. Проблемы надежности гидротехнических сооружений. СПб: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1991. 78 с.
4. Векслер А.Б., Ивашинцев Д.А., Стефанишин Д.В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2002. 591 с.
5. Кутляров Д.Н. Оценка состояния и комплексное обустройство водосбора р. Таналык Республики Башкортостан: дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 176 с.
6. Кутляров Д.Н., Кутляров А.Н. Прогнозный расчёт качества воды водохранилищ



Башкирского Зауралья // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2010. № 1. С. 47–51.

7. Вуколов Э.А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием

ем пакетов STATISTICA и EXCEL. М.: ИНФРА, 2004. 464 с.

8. Hoeg K. New dam safety legislation and the use of risk analysis / Int. J. of Hydropower and Dams. 1998. Vol. 5. Issue 5. P. 85–89.

REFERENCES

1. Abdrakhmanov R.F. Vodnye resursy Bashkortostana [Water resources of the Republic of Bashkortostan]. Melioratsiya i vodnoe hozyaystvo – Amelioration and Water Economy. Moscow, 2004, no. 3, pp. 6–8. (In Russian).
2. Abdrakhmanov R.F., Popov V.G. Formirovanie mineralnykh vod Bashkirskogo Preduralya [Formation of mineral waters in the Bashkir Cis-Urals]. Vestnik Akademii nauk Respubliki Bashkortostan – Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, 2011, no. 4, pp. 5–16. (In Russian).
3. Stefanishin D.V. Shulman S.G. Problemy nadezhnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Problems of reliability of hydraulic structures]. VNIIG imeni B.E. Vedeneeva. St. Petersburg, 1991. 78 p. (In Russian).
4. Veksler A.B. Ivashintsov D.A., Stefanishin D.V. Nadezhnost, socialnaya i ekologicheskaya bezopasnost gidrotekhnicheskikh obyektov: otsenka riska i prinyatie resheniy [Reliability, social and environmental safety of hydraulic engineering objects: Risk assessment and decision-making]. St. Petersburg, VNIIG imeni B.E. Vedeneeva, 2002, p. 591. (In Russian).

5. Kutliyarov D. N. Otsenka sostoyaniya i kompleksnoe obustroystvo vodosbora reki Tanalyk Respubliki Bashkortostan [Assessment and comprehensive improvement of the catchment area of the Tanalyk River in the Republic of Bashkortostan]. PhD Thesis in Technology. Moscow, 2009, 176 p. (In Russian).
6. Kutliyarov D.N., Kutliyarov A.N. Prognoznnyy raschet kachestva vody vodokhranilishch Bashkirskogo Zauralya [Forecast calculation of water quality in reservoirs of the Bashkir Trans-Urals]. Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta – Bulletin of the Bashkir State Agrarian University, 2010, no. 1, pp. 47–51. (In Russian).
7. Vukolov E.A. Osnovy statisticheskogo analiza. Praktikum po statisticheskim metodam i issledovaniyu operatsiy s ispolzovaniem paketov STATISTICA i EXCEL [Basics of statistical analysis. Workshop on statistical methods and operations research using the packages STATISTICA and EXCEL]. Moscow, INFRA, 2004. 464 p. (In Russian).
8. Hoeg K. New dam safety legislation and the use of risk analysis. Int. J. of Hydropower and Dams, 1998, vol. 5, issue 5, pp. 85–89.

