

УДК 627.514.2
DOI: 10.25686/2542-114X.2021.3.64

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДРЕНАЖНЫХ ВОД НА ОРОШЕНИЕ

А. Г. Турлов

Поволжский государственный технологический университет (г. Йошкар-Ола)

Создание водохранилищ на равнинных реках неизбежно ведет к затоплению прилегающих низменных территорий. Для уменьшения потерь таких площадей и продолжения их хозяйственного использования строятся инженерные защитные системы. Такие системы включают в себя дамбы, ограждающие низины, систему регулярных каналов и дрен на защищенной территории и насосные станции для перекачивания скапливающейся в каналах воды в водохранилище. На это расходуется значительное количество электроэнергии, а вода, перекачиваемая насосами, никак не используется. В то же время эту воду можно применять для орошения или другой хозяйственной деятельности не на самой защищаемой низине, а на прилегающих землях, расположенных выше уровня воды в водохранилище. При этом неизбежно увеличиваются затраты электроэнергии, поскольку возрастает расстояние перекачки воды, геодезическая высота подъёма, уменьшаются диаметры напорных трубопроводов. Для эффективного проектирования водохозяйственных систем с использованием ресурсов воды, скапливающейся в каналах инженерных систем, и материально-технических ресурсов насосных станций необходим инструмент многовариантного анализа возможных технических решений. Таким инструментом является математическая модель.

В работе предложена математическая модель, реализованная в среде Mathcad. Данная модель дает возможность на основе информации о технических параметрах конкретной системы инженерной защиты с учетом изысканий на прилегающей территории оценить возможные варианты комбинированной работы насосной станции с подачей части воды в искусственный водоём, находящийся на данной территории. При этом используются гидрологические и гидрометеорологические данные. В основе модели — взаимосвязанный водный баланс магистрального канала инженерной защиты и оросительного водоёма, устроенного с возможностью самотечной подачи воды на орошаемые поля, а также орошаемой территории. Модель позволяет в режиме реального времени определить график работы насосов как на наполнение водоёма, так и на откачку излишнего притока в водохранилище, а также определить текущие уровни и запасы воды в рассматриваемых ёмкостях.

Для демонстрации возможностей модели приведен пример с результатами почасового моделирования в течение водохозяйственного года. Получены зависимости основных параметров системы и результаты сравнения затрат энергии с «нулевым» вариантом, предусматривающим работу насосов только на откачку в водохранилище.

Ключевые слова: водохранилище; инженерная защита низин; дренажные воды; насосные станции, орошение.

Введение. Создание водохранилищ на равнинных реках неизбежно ведет к затоплению прилегающих низменных территорий. Для уменьшения потерь таких площадей и продолжения их хозяйственного использования строятся инженерные защитные системы. Такие системы включают в себя дамбы, ограждающие низины, систему регулярных каналов и дрен на защищенной территории

и насосные станции для перекачивания скапливающейся в каналах воды в водохранилище [1]. При этом значительное количество электроэнергии расходуется впустую. Более рационально было бы каким-то образом использовать воду, перекачиваемую насосами.

С учетом наличия загрязненного поверхностного притока снеговых и ливневых вод в водоёмы инженерной системы [7] наиболее

приемлемым вариантом является использование данных вод на орошение, поскольку в таком случае не требуется никакой водоподготовки, в отличие, например, от забора воды на коммунально-бытовое водоснабжение. Учитывая, что на существующих насосных станциях уже есть насосы, можно перенаправить поток воды в созданное на некотором возвышении искусственное водохранилище и организовать самотечную подачу воды из последнего на прилегающие земли. При этом потребуются дополнительные капитальные вложения, а также неизбежно возрастут затраты на перекачку воды из-за увеличения дальности и геодезического напора. Конечно, останется и частичная перекачка воды в водохранилище. Определить, в каком случае и при каких технических решениях удастся получить эффект, невозможно без многовариантного поиска. Это можно осуществить только с использованием математической модели.

Целью исследований является разработка математической модели системы инженерной защиты низинных берегов водохранилища с использованием дренажных вод на орошение.

Решаемые задачи, направленные на достижение цели:

– изучение конструктивных особенностей инженерных защит берегов водохранилищ на равнинных реках;

– изучение опыта математического моделирования систем орошения сельскохозяйственных земель;

– разработка модели водного баланса системы инженерной защиты низинных берегов водохранилища с использованием дренажных вод на орошение;

– построение расчетного имитационного комплекса в прикладной программной среде Mathcad.

Математическое моделирование. Для определения основных параметров инженерных систем защиты низинных берегов были проанализированы данные по Чебоксарскому водохранилищу. Установлено, что большин-

ство дамб возведено гидромеханизированным способом из донных карьеров. Дамбы имеют уположенный верховой откос. Уровни поверхности земли защищаемых низин находятся на отметке порядка 63–65 м в БСВ. Расчетное превышение уровня водохранилища a при проектной отметке 68 м в БСВ составляет около 5 м. Фактически дамбы эксплуатируются при отметке воды в водохранилище 63,0–63,5 м, что практически сопоставимо с отметками поверхности земли. Таким образом, инженерные защиты обеспечивают только снижение уровня грунтовых вод. Нормальные отметки уровней в магистральных каналах у насосных станций составляют 60,0–62,0 м, что на 1,5–2,0 м ниже уровня водохранилища. Тем не менее трубопроводы проложены под поверхностью дамбы, имеющей отметку 70 м. Следовательно, геодезическая высота подъема при работе насосов составляет около 8 м. Насосные станции оборудованы вертикальными осевыми насосами или низконапорными горизонтальными насосами с двухсторонним входом серии Д.

При существующем положении основной приток к низине обеспечивается с водосборной территории, хотя присутствует и фильтрационная составляющая при низких уровнях воды в магистральном канале. Для исследований водного баланса предложены различные математические модели и компьютерные программы [2]. Большое распространение получили математические модели для проектирования прудов для орошения [3]. В них используются статистически обработанные метеорологические данные по осадкам и испарению, а также режимы орошения сельскохозяйственных культур. В отличие от существующих моделей, рассматривающих естественные природные процессы, при использовании водоёмов инженерной защиты на орошение водный баланс будет формироваться не только естественным путем, но и с включением потоков воды, управляемых человеком. Поэтому образуется система, структурная схема которой представлена на рисунке 1.

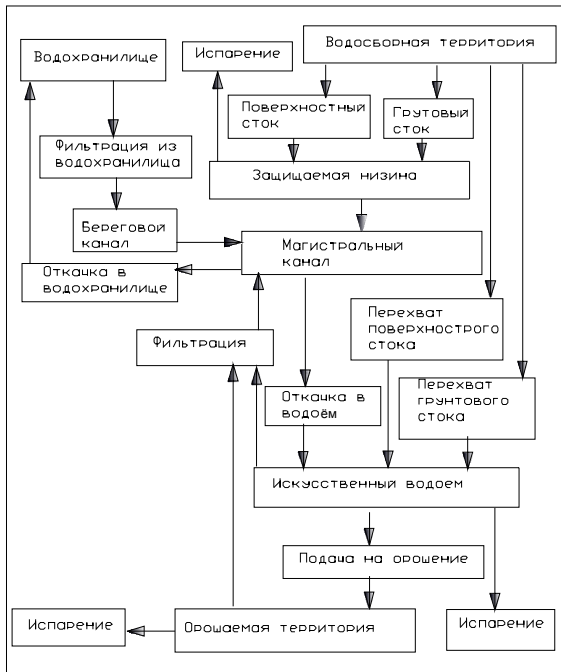


Рисунок 1. Структурная схема балансовой модели

Основными балансовыми ёмкостями для воды в данном случае являются два объекта: магистральный канал системы инженерной защиты и создаваемое водохранилище.

Магистральный канал, как правило, выполняют гидромеханизированным способом с достаточно большой шириной и глубиной. Поскольку в данном случае задача канала — не просто собирать дренажные воды с территории низины, а еще и обеспечивать запас воды для непрерывной работы насосов в течение определенного времени. При каждом включении насосов уровни в канале ощутимо падают. Для автоматизации процесса откачки для канала назначаются максимально возможный уровень $FOUmk$, при котором должны запускаться в работу все имеющиеся насосы, и минимально возможный уровень $MINmk$, при котором должны отключаться все насосы. Также с некоторым запасом Δmk определяются предмаксимальный ($FOUmk - \Delta mk$) и предминимальный ($MINmk + \Delta mk$) уровни. При достижении этих уровней количество насосов в одновременной работе может быть снижено.

В зависимости от текущего уровня Umk для канала устанавливаются зависимости, определяющие текущую площадь акватории и объем на основании обработки результатов гидрометрических изысканий [5–7].

$$vur1m = pspline(Hvmk, Fvmk)$$

$$Fvermk(z) = \text{int erp}(vir1m, Hvmk, Fvmk, z);$$

$$vur2m = pspline(Hvmk, Wvmk)$$

$$Wvermk(z) = \text{int erp}(vir2m, Hvmk, Wvmk, z),$$

а также обратная функция зависимости уровня от объема

$$Zvermk2(w) = l \text{int erp}(Wvmk, Hvmk, w),$$

где $Hvmk$ — массив уровней воды в магистральном канале;

$Fvmk$ — массив соответствующих этим уровням площадей акватории;

$Wvmk$ — массив объёмов, соответствующих этим уровням.

Приходную часть баланса магистрального канала составляют: дренаж через тело защитной дамбы, сток с водосборной территории (как поверхностный, так и грунтовый), осадки, дополнительная фильтрация из оросительного водохранилища и дренаж части неиспользуемых растениями оросительных вод. К расходной части относятся перекачка воды в водохранилище, перекачка в оросительный водоём, испарение.

Фильтрация через тело дамбы определяется размерами дамбы, коэффициентом фильтрации грунта Kfd в теле дамбы и разностью уровня воды в водохранилище $Zvhr$ и в магистральном канале Umk .

Для определения высоты высачивания фильтрационного потока hv на низовом откосе дамбы необходимо решить уравнение

Given

$$\frac{[h1^2 - (h2 + hv)^2]}{2(L0 - mdn \cdot hv)} = \frac{hv}{mdn} \left[1 + \ln \left(\frac{h2 + hv}{hv} \right) \right]$$

$$hv1 = Find(hv),$$

где $h1$ и $h2$ — глубина воды со стороны водохранилища и в магистральном канале;

$L0$ — приведенная длина фильтрационного потока;

mdn — коэффициент заложения низового откоса дамбы.

После чего безнапорный приток можно определить по выражению

$$Qdk2 = \frac{2 \cdot Kfd \cdot Ld \cdot So \cdot Tv}{L0} \cdot \frac{1}{1 + 0.637 \frac{Tv}{L0} \ln \left(\frac{1}{\sin \left(\frac{\pi \cdot Bdk}{2 \cdot Tv} \right)} L0 - mdn \cdot hv1 \right)},$$

где Tv — высота дна канала над водоупорным слоем;

Bdk — ширина дренажного канала по дну.

Общий приток будет равен сумме напорной и безнапорной частей:

$$Qdk = Qdk1 + Qdk2.$$

Учитывая, что изменение уровней воды в магистральном канале при работе насосов обычно не превышает 1 м и уровни водохранилища в вегетационный период относительно постоянны, данный приток можно считать постоянной величиной. При значительной сработке уровня водохранилища требуется определить функцию изменения притока в течение календарного периода.

Среднемноголетний расход притока с водосборной территории можно определить с учетом водосборной площади и модуля стока. А внутригодовое распределение — на основе распределения внутригодового стока

$$Xkal(t, z) = Fvermk(z) \cdot (FverX(t+1) - FverX(t)),$$

где Xst — массив осадков за интервал времени, соответствующий массиву интервалов времени Tst .

Аналогично определяется функция зависимости слоя испарения с водной поверхности от времени:

$$virE = pspline(Tst, Est)$$

$$Qdk1 = Kfd \cdot Ld \cdot \frac{[h1^2 - (h2 + hv)^2]}{2(L0 - mdn \cdot hv1)},$$

где Kfd — коэффициент фильтрации тела дамбы;

Ld — длина дамбы,

а напорная часть находится по зависимости

по реке-аналогу с учетом расчетной обеспеченности.

Итоговая функция определяется как

$$virW = pspline(Tst, Wst)$$

$$FverW(t) = \text{int } erp(virW, Tst, Wst, t),$$

где Wst — массив стока за интервал времени, соответствующий массиву интервалов времени Tst .

Суточный приток в текущую дату определяется по зависимости

$$Qka1(t) = FverW(t+1) - FverW(t).$$

Слой осадков в течение календарного периода определяется по данным метеостанций и задается в модели в виде функции

$$virX = pspline(Tst, Xst)$$

$$FverX(t) = \text{int } erp(virX, Tst, Xst, t).$$

Объем осадков в магистральном канале за сутки находится по зависимости

$$FverE(t) = \text{int } erp(virX, Tst, Est, t).$$

Объем испарения с поверхности магистрального канала за сутки находится по зависимости

$$Eka1(t, z) = Fvermk(z) \cdot (FverE(t+1) - FverE(t)).$$

Фильтрация из оросительного водоёма и сток с оросительных систем определяются объёмами воды в водохранилище, качеством гидроизоляции ложа, а также объёмами орошения и техникой полива.

Расход откачки воды в водохранилище получают путем решения уравнения

$$Htvhrp(q) = FverH(q) \\ Qotk1 := Find(q),$$

где $Htvhrp(q) = Htvhrp(q) + (Zgd - Umk)$ — напорная характеристика трубопровода с учетом разности уровня гребня дамбы Zgd и уровня воды в магистральном канале Umk ;

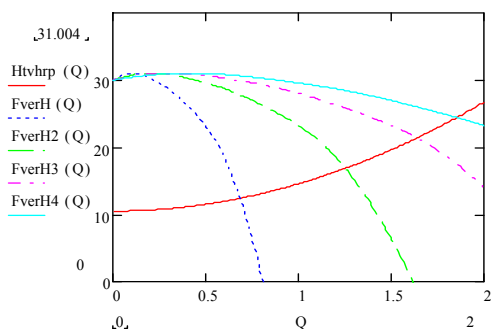


Рисунок 2. Работа насосов при параллельном соединении на трубопровод откачки в водохранилище

Приходную часть баланса оросительного водоёма составляют подача воды насосами из магистрального канала, прямые осадки, улавливаемый сток с водосборной территории. Расходная часть — это подача воды на орошаемые поля, испарение с зеркала водной поверхности и фильтрация.

В течение вегетационного периода объем воды в оросительном водоёме существенно изменяется. Соответственно изменяются уровень воды, площадь акватории и средняя глубина. Зависимость уровня от текущего объема задается функциями

$$vir21 = pspline(Wvt, Hvt) \\ ZWver(w) = interp(vir21, Wvt, Hvt, w),$$

$FverH(q)$ — напорная характеристика насоса, определяемая по паспортным данным в виде функции

$$virN = pspline(Qnas, Hnas)$$

$$FverH(q) = \text{int erp}(virN, Qnas, Hnas, q).$$

Поскольку насосы, используемые на насосных станциях, как правило, низконапорные, для подачи воды в оросительное водохранилище потребуется обвязка пар насосов последовательно. Поэтому рассматриваются варианты параллельной работы различного количества насосов при откачке в водохранилище (рис. 2) и попарной работы последовательно установленных насосов при подаче воды в оросительный водоём (рис. 3).

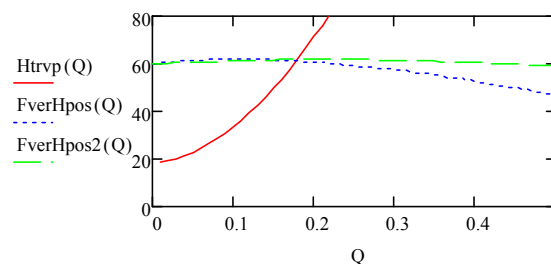


Рисунок 3. Работа насосов при последовательном соединении на трубопровод подачи в оросительный водоём

а зависимость текущего объёма, площади акватории и средней глубины функциями

$$vir2 = pspline(HvT, WvT)$$

$$Wver(z) = \text{int erp}(vir2, HvT, WvT, z);$$

$$vir1 = pspline(HvT, FvT)$$

$$Fver(z) = \text{int erp}(vir1, HvT, FvT, z),$$

где HvT — массив уровней воды в оросительном водоёме;

FvT — массив соответствующих этим уровням площадей акватории;

WvT — массив объёмов, соответствующих этим уровням.

Зависимость средней глубины от уровня задаётся функцией

$$H_{srver}(z) = \frac{W_{ver}(z)}{F_{ver}(z)}.$$

Объём воды на орошение в течение вегетативного периода определяется с учетом рассчитанной подекадно оросительной нормы $Oordek$ ($m^3/га$) выращиваемых культур

$$Xor(t, z) = F_{ver}(z) \cdot (F_{verX}(t+1) - F_{verX}(t)).$$

Объём испарения с поверхности оросительного водоёма за сутки определяется по зависимости

$$Eor(t, z) = F_{ver}(z) \cdot (F_{verE}(t+1) - F_{verE}(t)).$$

Фильтрация из оросительного водохранилища является функцией текущего объема и определяется по зависимости

$$Q_{for}(z) = W_{ver}(z) \cdot K_{pot},$$

где K_{pot} — удельные потери на фильтрацию с единицы объема воды в водоёме.

Фильтрация в магистральный канал с орошаемых земель принимается в размере 20 % от подаваемой на поля воды.

Имитационная математическая модель реализована в среде Mathcad.

Фрагмент модели приведен на рисунке 4.

Техника эксперимента и методика обработки результатов. С использованием данной модели проведен эксперимент, охватывающий годовой временной период начиная с принятого начала водохозяйственного года 1 марта.

При моделировании были приняты следующие исходные данные. Защищаемая низина имеет размеры 1×1 км. Защитная дамба длиной 1 км выполнена намывным способом с уположенным верховым откосом. Прилегающая к низине территория имеет уклон 0,005. Площадь водосбора низины 20 км^2 . На насосной станции установлены 4 насоса марки 2Д2000-21. Они соединены попарно параллельно на две линии диаметром 600 мм и длиной 145 м, служащих для откачки воды в водохранилище, а также попарно последовательно на две линии откачки воды в ороси-

тельный водоем. Диаметр трубопроводов 300 мм. Длина трубопроводов с учетом длины низины, длины прилегающих орошаемых земель и подпорной плотины 1800 м. Длина определялась с учетом размещения водоёма выше орошаемых земель для самотечной подачи воды на орошение. Перепад уровней в водохранилище и магистральном канале 4 м, перепад уровней в оросительном водоёме и магистральном канале 19 м. Орошаемая площадь 180 га, оросительная норма при выращивании капусты $5000 \text{ м}^3/га$.

$$W_{or} = \frac{Oordek}{10^3} \cdot \frac{For}{10^4} \cdot 1,2.$$

Функция расхода воды на полив

$$Q_{ors}(t) = \frac{W_{or}(t+1) - W_{or}(t)}{T_{or}}.$$

Объём осадков в оросительный водоём за сутки определяется по зависимости

Рассматривался следующий алгоритм работы насосной станции. При уровне воды в магистральном канале больше предминимального ($MINmk + \Delta mk$), но меньше предмаксимального ($FOUmk - \Delta mk$) включаются две линии на откачку в оросительный водоем. Уровень воды в оросительном водоёме должен быть ниже предминимального ($FOUov - \Delta ov$). При снижении уровня магистрального канала ниже предминимального одна линия отключается. Также одна линия отключается при превышении предмаксимального уровня в магистральном канале или предмаксимального уровня в оросительном водоёме. В этом случае вместо неё включается одна линия на откачку в водохранилище. При превышении максимального уровня воды в магистральном канале $FOUmk$ включаются две линии на откачку в водохранилище, а линия откачки в водоём отключается.

```

for i ∈ 1..(Tst12 + 1)·24
  y12i ← Qkal( $\frac{i}{24} - 1$ )·3600
  y13i ←  $\frac{Qdksut}{24}$ 
  y14i ← Qotk2·y7i-1·3600
  y15i ← Qtrv1·y9i-1·3600
  y20i ←  $\frac{Ekal(\frac{i-1}{24})}{1000}$ ·y2i-1
  y21i ←  $\frac{Xkal(\frac{i-1}{24})}{1000}$ ·y2i-1
  y3i ← y3i-1 + y12i + y13i - y14i - y15i - y20i + y21i
  y3i ← 0 if y3i < 0
  y1i ← ZWvemk2(y3i)
  y2i ← Fvemk(y1i)
  y16i ← Qor( $\frac{i}{24}$ )·3600
  y22i ←  $\frac{Ekal(\frac{i-1}{24})}{1000}$ ·y5i-1
  y23i ←  $\frac{Xkal(\frac{i-1}{24})}{1000}$ ·Forv(Zgrv)
  y24i ←  $\frac{0.002}{24}$ ·y6i-1
  y6i ← y6i-1 + y15i - y16i - y22i + y23i - y24i-1
  y4i ← ZWver2(y6i)
  y5i ← Fver1(y4i)
  y5i ← y5i if y5i < 0
  y17i ← y17i-1 + y8i-1
  y18i ← y18i-1 + y10i-1
  y7i ←  $\begin{cases} 2 & \text{if } y1_i > FOUmk \\ 1 & \text{if } y1_i \leq FOUmk \wedge y1_i > FOUmk - \Delta UV \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$ 
  y8i ← y7i·Nptrv
  y9i ←  $\begin{cases} 2 & \text{if } y1_i > MINUmk + \Delta UV \wedge y1_i < FOUmk - \Delta UV \wedge y4_i < Zgrv - 0.5 - \Delta UV \\ 1 & \text{if } (y1_i \leq MINUmk + \Delta UV \wedge y1_i \geq MINUmk \wedge y4_i < Zgrv - 0.5) \vee y1_i \leq FOUmk \wedge y1_i > FOUmk - \Delta UV \wedge y4_i < Zgrv - 0.5 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$ 
  y9i ←  $\begin{cases} y9_i & \text{if } i > 180 \cdot 24 \\ y9_i & \text{otherwise} \end{cases}$ 
  y10i ← y9i·Nptrv
  y19i ←  $\frac{i}{24}$ 
  continue

```

Рисунок 4. Фрагмент имитационной математической модели

При достижении максимального уровня в оросительном водоёме откачка идет только в водохранилище. А при достижении минимального уровня в магистральном канале $MINmk$ насосы отключаются полностью.

Данные по осадкам и испарению принимались по материалам метеорологических наблюдений и задавались подекадно.

Интерпретация результатов и их анализ. Результаты моделирования в течение водохозяйственного года отражены на рисун-

ках 5–12. На рисунке 5 представлены приходные и расходные части водного баланса магистрального канала.

Анализ результатов моделирования показывает, что в период стока снеготаяния с водосборной площади насосы, работающие на откачку, не справляются с притоком в магистральный канал и необходима интенсивная откачка в водохранилище. В этот период все насосы задействованы на перекачку воды в водохранилище.

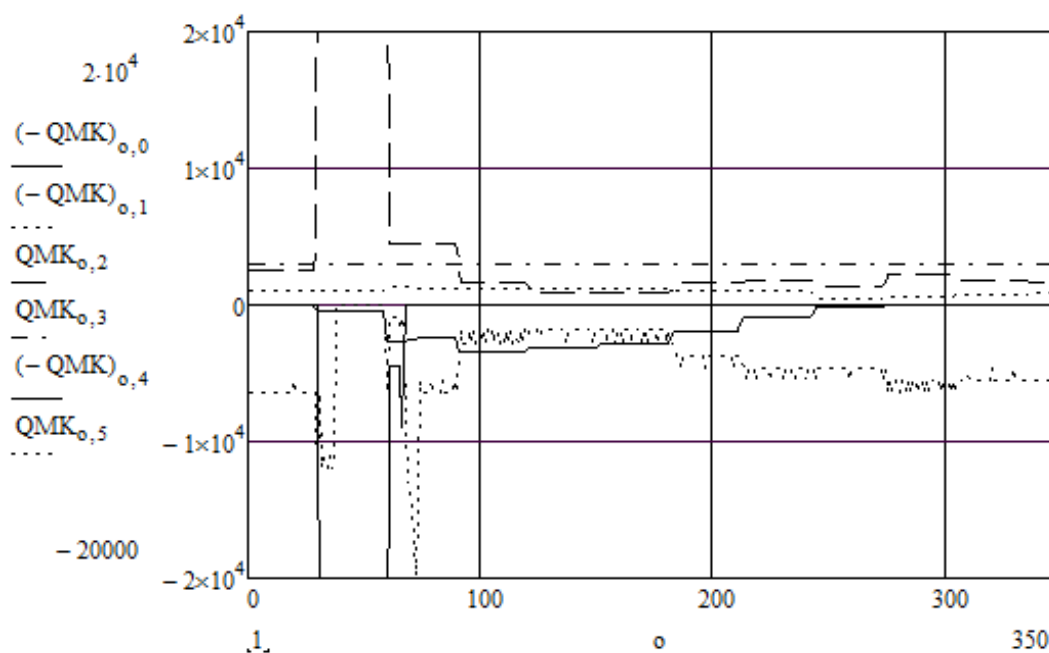


Рисунок 5. Суточный баланс магистрального канала с начала водохозяйственного года, м³/сут.:

$QMK_{o,0}$ — откачка в водохранилище; $QMK_{o,1}$ — откачка в оросительный водоём;
 $QMK_{o,2}$ — приток с водосборной территории; $QMK_{o,3}$ — инфильтрация из водохранилища;
 $QMK_{o,4}$ — испарение; $QMK_{o,5}$ — осадки

При этом уровни воды в магистральном канале поддерживаются выше форсированного уровня (рис. 7). В дальнейшем приток в магистральный канал значительно снижается и в нем можно поддерживать минимальные уровни, откачивая воду только в оросительный водоём.

На рисунке 6 показаны составляющие части водного баланса оросительного водоёма.

По графику видно, что наблюдаются значительные потери на орошение и испарение в течение вегетативного периода растений, в то время, как в период весеннего снеготаяния пополнения водоёма нет. Поэтому для создания необходимого запаса воды в оросительном водоёме требуется максимальное наполнение водоёма в течение всего года. График колебания уровня в оросительном водоёме показан на рисунке 8.

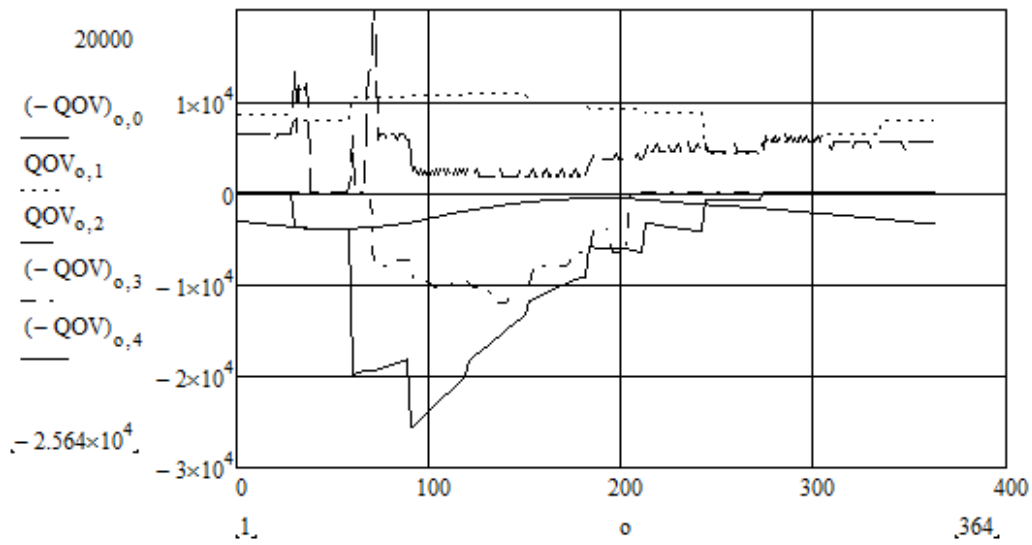


Рисунок 6. Суточный баланс оросительного водоёма с начала водохозяйственного года, м³/сут.:

$QOV_{0,0}$ — испарение; $QOV_{0,1}$ — осадки; $QOV_{0,2}$ — перекачка из магистрального канала; $QOV_{0,3}$ — расход на орошение; $QOV_{0,4}$ — фильтрация из водоёма

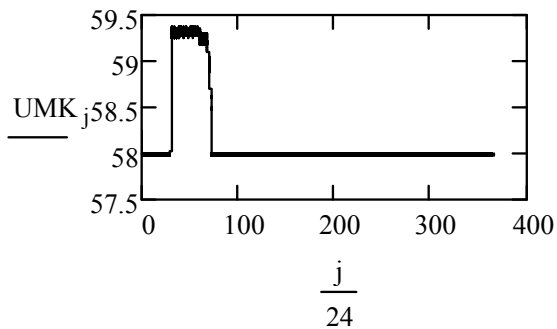


Рисунок 7. График колебания уровней воды в магистральном канале с начала водохозяйственного года

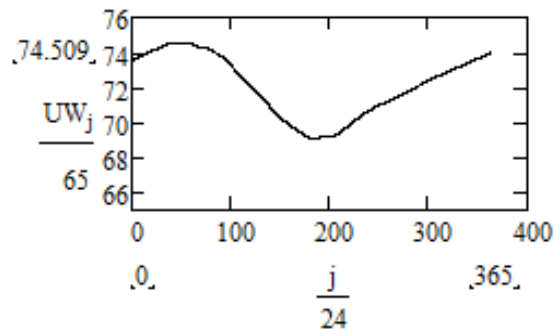


Рисунок 8. График колебаний уровня в оросительном водоёме с начала водохозяйственного года

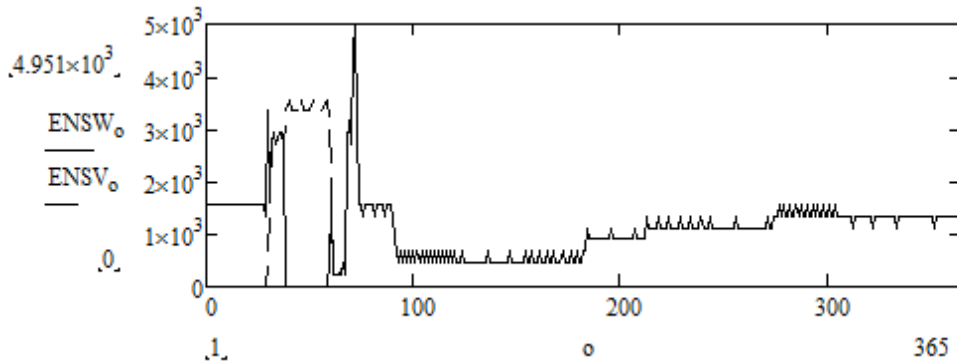


Рисунок 9. График колебания суточного потребления электроэнергии при перекачке в оросительный водоём $ENSW$ и откачке в водохранилище $ENSV$

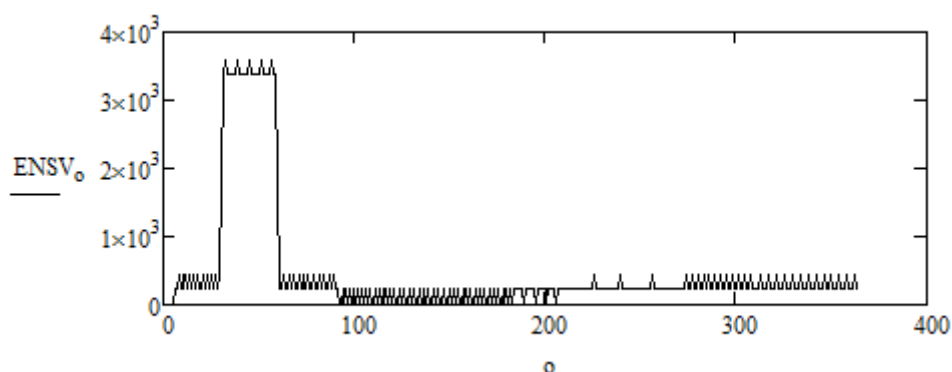


Рисунок 10. График колебания суточного потребления электроэнергии при откачке всей воды в водохранилище $ENSV$

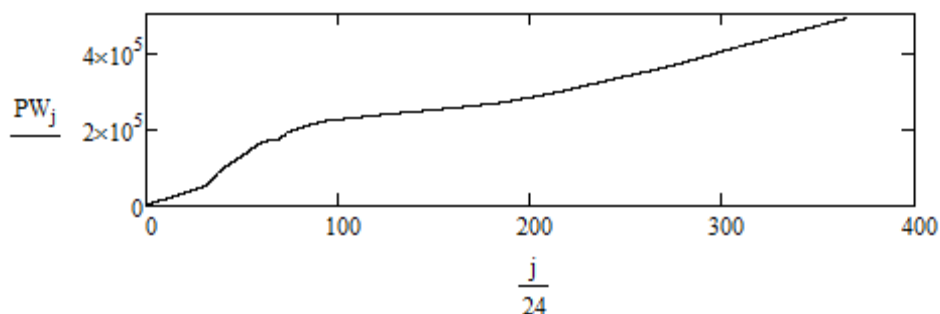


Рисунок 11. Интегральная кривая потребления электроэнергии насосами при откачке в водохранилище

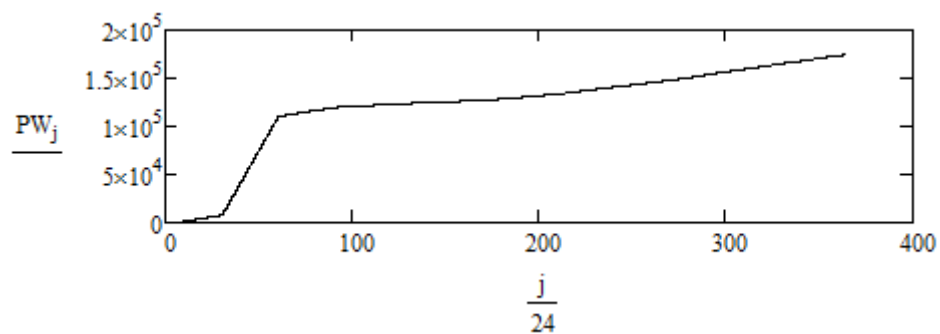


Рисунок 12. Интегральная кривая потребления электроэнергии насосами при откачке только в водохранилище

Суточное потребление электроэнергии насосами при откачке в водохранилище и перекачке в оросительный водоём показано на рисунке 9. Для сравнения приведен аналогичный график для случая обычной работы насосной станции, когда вся вода перекачивается в водохранилище (рис. 10).

Результаты моделирования показывают, что суммарное годовое потребление электроэнергии в рассмотренном примере (рис. 11, 12) возрастает почти в три раза. Однако суммарный эффект от продукции с орошаемых площадей ожидается значительно большим.

Выводы

Разработана методика, позволяющая на основе математического моделирования оценить целесообразность создания оросительных систем с использованием дренажных вод инженерных систем защиты низинных берегов водохранилищ.

Предложенная методика реализована в программной среде Mathcad.

Имитационное моделирование показывает возможность использования насосных станций систем инженерной защиты берегов водохранилищ для орошения сельскохозяйственных культур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 104.13330.2016 Инженерная защита территории от затопления и подтопления. Актуализированная редакция СНиП 2.06.15-85. Дата введения 2017-06-17.
2. Поздеев А. Г., Кузнецова Ю. А., Ржепкин А. Ю. Информационно-технологическая модель водного баланса речного бассейна // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 11 (6). С. 1253–1256.
3. Model to Estimate Hydrological Processes and Water Budget in an Irrigation Farm Pond / Ying Ouyang, Joel O. Paz, Gary Feng, John J. Read, Ardeshir Adeli, Johnie N. Jenkins. A // *Water Resour Manage*, 2017. Pp. 2225–2241. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-017-1639-0> (дата обращения: 29.11.2018).
4. Характеристики пространственного распределения гидрологических и экологических показателей речной сети Республики Марий Эл / Е. А. Гончаров, М. А. Ануфриев, А. Г. Обухов, Л. И. Севостьянова // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2020. № 4 (48). С. 61–76.
5. Поздеев А. Г., Кузнецова Ю. А. Основы математического моделирования: практикум. Йошкар-Ола : ПГТУ, 2017. 90 с.
6. Солодов А. П., Очков В. Ф. Mathcad / Дифференциальные модели. Москва : Издательство МЭИ, 2002. 239 с.
7. Скологубович Ю. Л., Войтов Е. Л., Цыба А. А. Проблема очистки поверхностных сточных вод // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. 2018. № 4 (8). С. 84–91.

Информация об авторе

ТУРЛОВ Алексей Генрихович — кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций и водоснабжения, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов: обустройство акваторий искусственных и естественных водных объектов. Автор 75 публикаций.
E-mail: TurlovAG@volgatech.net

UDC 627.515
DOI: 10.25686/2542-114X.2021.3.64

MATHEMATICAL MODEL OF THE ENGINEERING PROTECTION OF THE SHORE RESERVOIRS WITH THE USE OF DRAINAGE WATER FOR IRRIGATION

A. G. Turlov

Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola)

The creation of reservoirs on lowland rivers inevitably leads to the flooding of adjacent lowland areas. To reduce the loss of such areas and continue their economic use, engineering

protective systems are being built. Such systems include dams that enclose lowlands, a system of regular canals and drains in the protected area, and pumping stations for pumping accumulated water in the canals into the reservoir. This consumes a significant amount of electricity, and the water pumped over by the pumps is not used in any way. At the same time, this water can be used for irrigation purposes or other economic activities. Not on the most protected lowland, but on the adjacent lands located above the water level in the reservoir. At the same time, electricity costs inevitably increase. As the distance of water pumping increases, the geodetic height of the rise, the diameters of the pressure pipelines decrease. For the effective design of water management systems using the resources of water accumulating in the channels of engineering systems and the material and technical resources of pumping stations, a tool for multivariate analysis of possible technical solutions is required. Such a tool is a mathematical model.

The paper proposes a mathematical model implemented in the MathCad environment. The mathematical model makes it possible, on the basis of information on the technical parameters of a specific engineering protection system, taking into account surveys in the adjacent territory, to assess possible options for the combined operation of a pumping station with the supply of a part of the water to an artificial reservoir located in this territory. It uses hydrological and hydrometeorological data. The model is based on the interconnected water balance of the main canal of engineering protection and an irrigation reservoir, arranged with the possibility of gravity supply of water to irrigated fields, as well as to the irrigated area. The model makes it possible to determine in real time the pump operation schedule, both for filling the reservoir and for pumping out excess inflow into the reservoir. And also determine the current levels and reserves of water in the containers under consideration.

To demonstrate the capabilities of the model, an example is given with the results of hourly modeling during a water management year. The dependences of the main parameters of the system and the results of comparing the energy consumption with the "zero" option, providing for the operation of the pumps only for pumping out into the reservoir, are obtained.

Keywords: reservoir; engineering protection of lowlands; drainage water; pumping stations, irrigation

REFERENCES

1. SP 104.13330.2016 Inzhenernaja zashhita territorii ot zatopenija i podtoplenija. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 2.06.15-85 [SP 104.13330.2016 Engineering protection of the territory from flooding and flooding. Updated version of SNiP 2.06.15-85]. Date of introduction 2017-06-17.
2. Pozdejev A. G., Kuznetsova Yu. A., Rzhepkin A. Yu. Informacionno-tehnologicheskaja model' vodnogo balansa rechnogo bassejna [Information and technological model of the water balance of the river basin]. *Fundamental'nye issledovanija* [Fundamental research], 2014, no. 11 (6), pp. 1253–1256.
3. Ying Ouyang, Joel O. Paz, Gary Feng, John J. Read, Ardeshir Adeli, Johnie N. Jenkins. A Model to Estimate Hydrological Processes and Water Budget in an Irrigation Farm Pond // *Water Resour Manage*, 2017, pp. 2225–2241. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-017-1639-0> (date of application: 29.11.2018).
4. Goncharov E. A., Anufriev M. A., Obukhov A. G., Sevostyanova L. I. Harakteristiki prostranstvennogo raspredelenija gidrologicheskikh i jekologicheskikh pokazatelej rechnoj seti Respubliki Marij El [Characteristics of the spatial distribution of hydrological and ecological indicators of the river network of the Republic of Mari El]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo univepsiteta. Ser.: Les. Jekologija. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State University of Technology. Series: Forest Ecology. Environmental management], 2020, no. 4 (48), pp. 61–76.
5. Pozdeev A. G., Kuznetsova Yu. A. Osnovy matematicheskogo modelirovanija: praktikum [Fundamentals of mathematical modeling: practicum]. Yoshkar-Ola : PSTU, 2017. 90 p.
6. Solodov A. P., Ochkov V. F. Mathcad/Differencial'nye modeli [Mathcad/Differential models]. Moscow : MEI Publishing House, 2002. 239 p.

7. Skolubovich Yu. L., Voitov E. L., Tsyba A. A. Problema oчитki poverhnostnyh stochnyh vod [The problem of surface sewage treatment]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Ser.: Materialy. Konstrukcii. Tehnologii* [Bulletin of the Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies], 2018, no 4(8), pp. 84–91.

Information about of author

TURLOV Alexey Genrikhovich — Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Building Constructions and Water Supply, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Area of scientific interests: arrangement of water areas of artificial and natural water bodies. Author of 75 publications. E-mail: TurlovAG@volgatech.net.

Библиографическая ссылка

Турлов А. Г. Математическая модель системы инженерной защиты берегов водохранилища с использованием дренажных вод на орошение // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. — 2021. — № 3 (19). — С. 64–76. — DOI: 10.25686/2542-114X.2021.3.64.