

# КОГНИТИВНЫЙ АНАЛИЗ И ЧИСЛЕННО- АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СТАЦИОНАРНОГО ПАВОДКОВОГО ГИДРОГРАФА СОЦИОПРИРОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ «ВОЛЖСКАЯ ГЭС–ВОЛГО-АХТУБИНСКАЯ ПОЙМА»

Подшипкова Ю. Е.<sup>1</sup>

(Волгоградский государственный университет, Волгоград)

*В результате когнитивного анализа социоприродохозяйственной системы «Волжская ГЭС – Волго-Ахтубинская пойма» сформулирована задача условной многокритериальной оптимизации паводкового гидрографа Волжской ГЭС на множестве стационарных гидрографов. Разработан и реализован алгоритм численного построения Парето-оптимального множества решения этой задачи с использованием аналитических зависимостей, описывающих паводковый гидрологический режим Волго-Ахтубинской поймы. Данная модель может служить основой решения задачи эколого-экономического управления в социоприродохозяйственной системе «Волжская ГЭС – Волго-Ахтубинская пойма».*

Ключевые слова: социоприродохозяйственная система, паводковый гидрограф, многокритериальная оптимизация, когнитивный анализ.

## 1. Введение

Волго-Ахтубинская пойма – это уникальное природное образование общей площадью более 2000 км<sup>2</sup>, территориально

---

<sup>1</sup> Подшипкова Юлия Евгеньевна, студент,  
(podschipkova1993@mail.ru).

ограниченное рекой Волгой и ее рукавом Ахтубой, отличающееся орнитологическим международным значением (места гнездования и отдыха птиц, заливные луга с максимальной продуктивностью, нерестилища, плодородные пойменные земли, водно-болотные угодья). В настоящее время экологическая обстановка с Волго-Ахтубинской поймой очень непростая. В последние годы в результате несоблюдения экологического режима сброса воды Волжским гидроузлом имеются основания говорить о катастрофической ситуации. В 2006 г. из-за маловодья без влаги остались 90 % озер и ериков, уровень подземных вод существенно снизился. Вместо необходимых 120 миллионов кубометров воды в паводок через плотину сбросили почти в два раза меньше [1]. Пойма как целостная экологическая система может повторить судьбу Аральского моря.

Данная проблема вызвана хозяйственно-ориентированной динамикой поступления воды на территорию поймы через плотину Волжской ГЭС. График изменения во времени расхода воды в водотоке называется гидрографом. Как правило, гидрограф характеризуется меженными периодами (обычно с июля по март) и периодом весеннего половодья (апрель — июнь). Паводковый характер обусловлен таянием снега в верховьях Волги и, соответственно, повышенным количеством талой воды. Именно в это время происходит наполнение большинства водных объектов поймы. С сооружением каскада гидроэлектростанций на Волге и, в особенности Волжской ГЭС, сброс воды стал регулируемым, то есть зависящим от работы гидротехнических сооружений.

Главная проблема выбора режима попуска воды (периодического сброса воды из водохранилища для регулирования уровня воды в нем) – согласование требований различных заинтересованных отраслей народного хозяйства Нижней Волги–энергетиков, рыбного и сельского хозяйства, водного транспорта, коммунальных служб, рекреационной деятельности и др.

Современный гидрологический режим социоприродохозяйственной системы «Волжская ГЭС – Волго-Ахтубинская пойма» (СПХС «ВГЭС-ВАП»), определяемый хозяйственно-экономическими приоритетами, ведет к прогрессирующему обезвоживанию Волго-Ахтубинской поймы [1]. Кардинально

изменить негативную природную динамику СПХС невозможно без создания и реализации модели управления паводковым гидрологическим режимом Волго-Ахтубинской поймы (ВАП), в которой ключевое место занимает оптимизация паводкового гидрографа Волжской ГЭС.

## **2. Когнитивный анализ СПХС «ВГЭС-ВАП»**

На основе когнитивного анализа [3] были выделены следующие подсистемы (социальная, природная, хозяйственная (которая, в свою очередь, подразделяется на техническую и экономическую)) и субъекты (ВГЭС, жители ВАП, жители г.Волгоград и г.Волжский, экономические агенты (ЭА) ВАП и г.Волгоград ) СПХС «ВГЭС-ВАП». Каждого субъекта СПХС «ВГЭС-ВАП», в свою очередь, можно отнести к одной или нескольким подсистемам:

- 1)природная (жители ВАП);
- 2)социальная (жители ВАП, жители г.Волгоград и г.Волжский);
- 3)хозяйственная: техническая(ВГЭС) и экономическая (ВГЭС, хозяйствующие субъекты ВАП и г.Волгоград, судоходство).

Анализ социально-экономической ситуации в СПХС «ВГЭС-ВАП» позволяет построить иерархию ее гидрологических приоритетов – критериев управления гидрологическим режимом для каждого субъекта системы.

Приоритеты субъектов:

- безопасность (угроза затопления и обезвоживания);
- экономические (природные условия экономической деятельности);
- экологические (сохранение природы);
- социальные (условия жизни).

На основании анализа приоритетов субъектов СПХС были выявлены критерии (требования к состоянию СПХС «ВГЭС-ВАП») субъектов, каждый из которых можно определить в одну

из следующих групп: экологические, экономические, социальные критерии, а также критерий безопасности.

Анализ позволил выделить следующие основные параметры:

$S_{зам}(t)(S_{мин}, S_{макс})$  – текущая (минимально, максимально допустимая) площадь паводкового затопления,

$Q(t)(Q_{макс})$  – текущий (максимальный) расход воды,  $V$  – объем паводкового гидрографа,

$S_{рх}(S_{рх}^{мин}, S_{рх}^{макс}, S_{рх}^{opt})$  – реальная (минимально, максимально, оптимально допустимая) площадь нерестилищ,

$T_{рх}(T_{рх}^{мин}, T_{рх}^{макс}, T_{рх}^{opt})$  – реальный (минимально, максимально, оптимально допустимый) период нереста,

$S_{прир}^{opt}(S_{эк}^{opt}, S_{соц}^{opt})$  – экологически (экономически, социально) оптимальная площадь затопления, гидрологическая безопасность ВГЭС, региона. В следующей таблице приведены гидрологические приоритеты субъектов СПХС «ВГЭС–ВАП».

Таблица 1. Критерии субъектов СПХС «ВГЭС–ВАП»

критерий субъект	экологический	экономический	безопасность	социальный
Центр (регион. и федерал. власть)	$\max_t S_{зам}(t) = S_{прир}^{opt}$	$S_{мин} \leq \max_t S_{зам}(t) \leq S_{макс}$	Безопасность ВГЭС $\max_t Q(t) \leq Q_{макс}$ $\max_t S_{зам}(t) \leq S_{макс}$ $S_{рх}^{мин} \leq S_{зам}(t) \leq S_{рх}^{макс}$ $T_{рх}^{мин} \leq T_{рх} \leq T_{рх}^{макс}$	$\max_t S_{зам}(t) = S_{соц}^{opt}$
ЭА ВГЭС	нет	$V \rightarrow \min$	Безопасность ВГЭС $Q(t) \leq Q_{макс}$	нет

ЭА ВАП (сельское, лесное хозяйство)	$\max_t S_{\text{зам}}(t) = S_{\text{прир}}^{\text{opt}}$	$\max_t S_{\text{зам}}(t) = S_{\text{эк}}^{\text{opt}}$	Безопасность ВГЭС $S_{\min} \leq \max_t S_{\text{зам}}(t) \leq S_{\max}$	$\max_t S_{\text{зам}}(t) = S_{\text{соц}}^{\text{opt}}$
ЭА ВАП (рыбное хозяйство)	$S_{\text{зам}}(t) \geq S_{\text{px}}$	$S_{\text{px}} = S_{\text{px}}^{\text{opt}}$ $T_{\text{px}} = T_{\text{px}}^{\text{opt}}$	Безопасность ВГЭС $S_{\text{px}}^{\min} \leq S_{\text{зам}}(t) \leq S_{\text{px}}^{\max}$ $T_{\text{px}}^{\min} \leq T_{\text{px}} \leq T_{\text{px}}^{\max}$	$\max_t S_{\text{зам}}(t) = S_{\text{соц}}^{\text{opt}}$
Жители ВАП	$\max_t Q(t) \leq Q_{\max}$ $\max_t S_{\text{зам}}(t) = S_{\text{прир}}^{\text{opt}}$	$S_{\min} \leq \max_t S_{\text{зам}}(t) \leq S_{\max}$	Безопасность ВГЭС $\max_t Q(t) \leq Q_{\max}$ $\max_t S_{\text{зам}}(t) = S_{\text{прир}}^{\text{opt}}$	$\max_t S_{\text{зам}}(t) = S_{\text{соц}}^{\text{opt}}$
ЭА ВАП (рекреаци- онные объекты)	$\max_t S_{\text{зам}}(t) = S_{\text{прир}}^{\text{opt}}$	$T_{\text{px}} = T_{\text{px}}^{\text{opt}}$ $S_{\min} \leq \max_t S_{\text{зам}}(t) \leq S_{\max}$	Безопасность ВГЭС $\max_t Q(t) \leq Q_{\max}$ $\max_t S_{\text{зам}}(t) \leq S_{\max}$	$\max_t S_{\text{зам}}(t) = S_{\text{соц}}^{\text{opt}}$
Жители г.Волгогра д и г.Волжски й	$\max_t S_{\text{зам}}(t) = S_{\text{прир}}^{\text{opt}}$ $S_{\text{зам}}(t) \geq S_{\text{px}}$ $S_{\min} \leq \max_t S_{\text{зам}}(t) \leq S_{\max}$	нет	Безопасность ВГЭС	$\max_t S_{\text{зам}}(t) = S_{\text{соц}}^{\text{opt}}$
ЭА г.Волгогра д и г.Волжски й	нет	нет	Безопасность ВГЭС	$\max_t S_{\text{зам}}(t) = S_{\text{соц}}^{\text{opt}}$

Рассмотрим критерии каждого субъекта подробнее.

Центр: Критерий безопасности для центра складывается из совокупности всех критериев безопасности для каждого субъекта ВАП. Центр заинтересован в достижении экологически оптимального значения площади затопления ВАП. Также центру невыгодно затопление, превышающее некоторое критическое значение, при котором начинается подтопление жилых домов, но, в тоже время желательно учитывать минимально допустимое значение площади затопления, необходимое для нормального функционирования на территории поймы.

Экономический агент ВГЭС: Для руководства ВГЭС основным является экономический критерий – максимизация суммарного расхода воды через турбины ВГЭС, что достигается минимизацией объема паводкового гидрографа. К критерию безопасности можно отнести условие на максимальное значение пуща воды  $Q(t)$ . Экологический критерий не представляет интереса для данного субъекта.

Экономический агент ВАП (сельское и лесное хозяйство): Для данных субъектов безопасным критерием является соблюдение безопасного (минимально необходимого) значения площади затопления  $S_{\min} \leq \max S_{\text{зат}}(t) \leq S_{\max}$  с целью создания оптимальных условий для существования растительности ВАП. Экологическим критерием данного субъекта является в достижении экологически оптимального значения площади затопления ВАП. Экономический критерий заключается в достижении экономически оптимального значения площади затопления ВАП.

Экономический агент ВАП (рыбное хозяйство): Для рыбохозяйств экологический критерий состоит в необходимости затопления нерестилищ (площади  $S_{\text{рх}}$ ) в течение периода нереста  $T_{\text{рх}}$ . Экономический критерий данного субъекта заключается в достижении оптимальных значений площади нерестилищ и периода нереста. Критерий безопасности в данном случае представляется расширением экономического критерия с учетом максимально и минимально допустимых значений  $T_{\text{рх}}$  и  $S_{\text{рх}}$ .

Жители ВАП: Для жителей ВАП необходима реализация гидрологической безопасности, определяемой безопасным режимом затопления  $\max Q(t) \leq Q_{\max}$  и предельно допустимым значением ее затопляемой площади. С другой стороны, жите-

лям ВАП невыгодно затопление, превышающее критическую отметку, вследствие чего возможно затопление жилой зоны. В тоже время необходимо учитывать минимально допустимое значение площади затопления, необходимое для нормального существования на территории поймы. Экологический критерий совпадает с критерием безопасности данного субъекта.

Экономический агент ВАП (рекреационные объекты): Для владельцев рекреационных объектов (базы отдыха, туристические базы, санатории) критерий безопасности такой же, как и у жителей ВАП – недопущение затопления территории поймы. Экономический критерий представляет собой объединение экономических критериев сельского и рыболовного хозяйства. Экологическим критерием является достижение оптимального значения площади с целью создания пригодных условий для растительности ВАП.

Жители г. Волгоград и г. Волжский: Экологическим критерием для жителей г.Волгограда и г.Волжского является сохранение биоразнообразия ВАП(для возможности отдыха на территории поймы, а также для улучшения качества атмосферного воздуха г.Волгограда и г.Волжского), которое достигается выполнением следующих условий:  $\max_t S_{\text{зат}}(t) = S_{\text{прир}}^{\text{opt}}, S_{\text{зат}} \geq S_{\text{рх}},$

$S_{\text{min}} \leq \max S_{\text{зат}}(t) \leq S_{\text{max}}$ . К экономическому критерию и критерию безопасности можно отнести условие поддержание оптимального уровня воды в р. Волге, которое в настоящее время численно не может быть описано.

Экономические агенты г. Волгоград и г. Волжский: Для субъектов хозяйственно-экономической деятельности г. Волгограда и г. Волжского не существует экологического критерия. К экономическому критерию и критерию безопасности можно отнести условие поддержание оптимального уровня воды в р. Волге.

Основным критерием безопасности для каждого субъекта СПХС «ВГЭС-ВАП» является безопасность ВГЭС: в случае превышения критической отметки уровня Волгоградского водохранилища открываются все створы и остальные ограничения и критерии игнорируются. Социальный критерий представляет

собой достижение социально оптимального значения площади затопления.

### 3. Постановка задачи поиска оптимального гидрографа

При условии выполнения ограничений безопасности, получим оптимизационную задачу условной оптимизации паводкового гидрографа:

$$V \rightarrow \min_G, S_{\text{зат}} = \min(S_{\text{прир}}^{\text{opt}}, S_{\text{эк}}^{\text{opt}}, S_{\text{соц}}^{\text{opt}}), T_{\text{рх}} \rightarrow T_{\text{рх}}^{\text{opt}}, T_{\text{рх}}^{\min} \leq T_{\text{рх}}^{\text{opt}} \leq T_{\text{рх}}^{\max},$$

$$(1) S_{\text{рх}} \rightarrow S_{\text{рх}}^{\text{opt}},$$

$$S_{\text{рх}}^{\min} \leq S_{\text{рх}}^{\text{opt}} \leq S_{\text{рх}}^{\max}, Q(t) \leq Q_{\max}, S_{\text{зат}} \leq S_{\max},$$

где  $G=\{Q, \tau\}$  характеризует гидрограф ( $Q$  – расход воды,  $\tau$  – период паводкового затопления).

На рис.1 представлены зависимости площади затопления от времени для плановых и реальных гидрографов.

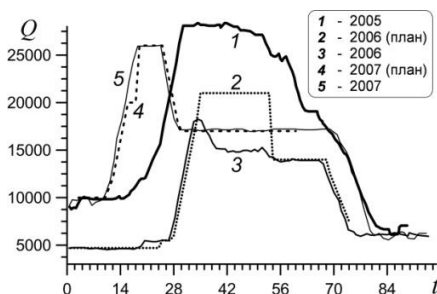


Рис. 1. Реальные и плановые гидрографы 2005-2007гг.

Задачи управления СПХС «ВГЭС-ВАП» классифицируют на краткосрочные, среднесрочные и долгосрочные [2]. Задача поиска оптимального гидрографа относится к краткосрочным задачам управления. К среднесрочным задачам управления можно отнести задачу оптимизации гидротехнических проектов улучшения гидрологического режима, а долгосрочной задачей

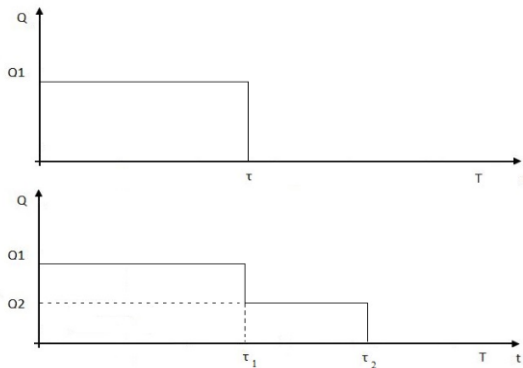


управления является создание системы эколого-экономического управления СПХС «ВГЭС-ВАП».

Наибольшая проблема СПХС «ВГЭС-ВАП» заключается в отсутствии достоверной прогнозной информации по развитию весеннего половодья. Фактические сроки и объемы половодья часто не совпадают с прогнозируемыми, что приводит к неоптимальным управленческим решениям. При обсуждении этого вопроса специалисты указывают на форму его графика, максимально приближенную к естественному (до зарегулирования) [1]. Однако, реализовать его в условиях зарегулированности представляется маловероятным, но максимально приблизить, начиная с максимальных расходов, возможно.

Поиск оптимального гидрографа заключается в построении планового гидрографа, удовлетворяющего условиям задачи (1). Рассмотрим задачу поиска оптимального гидрографа на примерах одноступенчатого и двухступенчатого гидрографов.

На рис.2 представлены модельные одноступенчатый и двухступенчатый гидрографы.



*Рис. 2. Модельные одноступенчатый (вверху) и двухступенчатый (внизу) гидрографы.*

Здесь  $Q_1$ ,  $Q_2$ - среднесуточный расход воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ ),  $\tau_1$ - период затопления (с),  $\tau_2$ - период слива (с),  $T$  - период наблюдения (с).

На основе гидродинамического моделирования были созданы трехзональная модель рельефа северной части ВАП, состоящая из низменностей, плоских склонов и холмов с удельными весами площадей зон соответственно  $\mu_1=0,6$ ,  $\mu_2=0,3$ ,  $\mu_3=0,1$  и высотой холмов  $H=4$  м, а также две модели гидросистемы (рис. 4): показательная (1) и степенная (2).

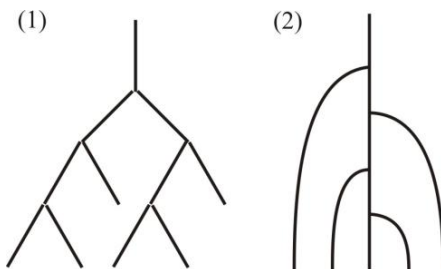


Рис. 4. Показательная и степенная модели гидросистемы ВАП

Уточненная модель площади затопления с коэффициентами, приведенными в статье [3], выражается квадратурной формулой:

$$(2) \quad S_{\text{зат}}(h, \theta) = S_{\text{зат}}(0, 0) + \int_0^{h/\alpha} \theta(x) dx,$$

где функция  $\theta(x)$  характеризует модель гидросистемы. Для показательной модели функция  $\theta(x)$  имеет вид:

$$(3) \quad \theta(x) = N l e^{\gamma x} \left[ \mu_1 + \int_0^{\frac{h-\alpha x}{H}} \mu_2 + \mu_3 \left(1 - \frac{y}{4}\right) dy \right]$$

при  $\gamma=0,001 \ln 2$  ( $g$  – среднее число ветвлений,  $g \approx 2,25$ ), а для степенной модели  $\theta(x)$  выражается формулой:

$$(4) \quad \theta(x) = N l \frac{m(m+1)}{2} x \left[ \mu_1 + \int_0^{\frac{h-\alpha x}{H}} \mu_2 + \mu_3 \left(1 - \frac{y}{4}\right) dy \right],$$

где  $m=3$  – среднее число ветвлений, соответствующее эмпирическим оценкам,  $N=32$  – число локальных гидросистем,  $l=1000$  м – максимальная дальность разлива вод из ерика,  $\alpha=0,0006$  – уклон дна,  $S_{\text{зат}}(0,0)=2,1 \cdot 10^8 \text{ м}^2$  – площадь ериков и озер.

Формулы затопления ВАП двухкаскадным стационарным гидрографом  $Q(t)=Q_1$  ( $t_0 \leq t \leq \tau_1$  – фаза подъема воды) и  $Q(t)=Q_2$  ( $\tau_1 \leq t \leq \tau_2$  – фаза спуска воды):

$$(5) S(t, Q_1) = S_{zam}(h(Q_1), \theta) * \varphi(Q_1, t), \text{ где } \varphi(Q_1, t) = 1 - e^{-aQ_1 t},$$

$$S(\tau) = S_{max}, S(t, Q_2, S_{max}) = S_{max} - S_{зат}(h(\tilde{Q}), \theta) \varphi(\tilde{Q}, t - \tau).$$

Одноступенчатый гидрограф является частным случаем двухступенчатого при  $Q_2=0$ .

Фиксируя  $S_{px} = S_{px}^{opt}$  и  $T_{px} = T_{px}^{opt}$ , заменяем оптимизационную задачу краевой (так как для формулы затопления  $\forall t$  из условия  $S_{зат}(t, Q_1) > S_{зат}(t, Q_2)$  следует, что  $Q_1 > Q_2$ , аналогично, для формулы слива из условия  $S_{зат}(t, Q, \tau_1) > S_{зат}(t, Q, \tau_2)$  следует, что  $\tau_1 > \tau_2$ , а также отклонение от оптимальных значений  $S_{px}$  и  $T_{px}$  сопровождается чрезмерным затоплением или, наоборот, нехваткой затопленной территории).

Задачу поиска оптимального гидрографа (1) в общем виде записывается следующим образом:

$$(6) \max_t S_z(t) \rightarrow \max_G$$

При ограничениях:

$$(7) V = Q_1 \tau_1 + (\tau_2 - \tau_1) Q_2 \leq V_{max}$$

$$(8) S_{zam}(t) \geq S_{px}, t \in [t_1, t_2] \text{ и } (t_2 - t_1) \geq t_{px}$$

$$(9) \max_t S_{zam}(t) \leq S_{max}$$

$$(10) Q_1 \leq Q_{max}, S_{px} \geq S_{px}^{min}, T_{px} = T_{px}^{opt}$$

Параметры  $Q_{max}$ ,  $S_{px}$ ,  $t_{px}$ ,  $S_{max}$  считаются известными.

В случае одноступенчатого гидрографа значение  $\tau_2$  совпадает со значением периода наблюдения  $T$ .

#### 4. Результаты численных экспериментов

Для решения задачи использовались представленные в [2] аналитические аппроксимации рельефа, гидросистемы, переходных динамических характеристик паводкового затопления ВАП, построенные на основе результатов гидродинамического моделирования, описанного в [4].

Результаты, полученные для  $t_{px}=45$  дней,  $Q_{max}=30000 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $S_{px}$ , изменяющегося от 1 до 10% от площади территории ВАП, представлены на следующих графиках:

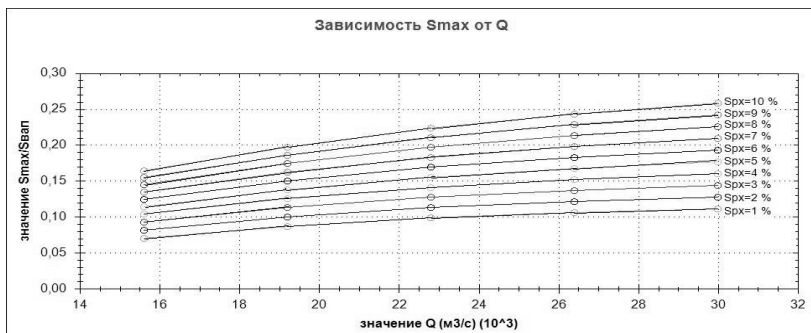


Рис. 5. Зависимость максимального значения площади затопления от расхода воды при фиксированном  $S_{px}$

Анализируя полученное изображение, можно заметить, что при  $Q=Q_{max}$  достигается максимальное значение площади затопления, а также увеличение  $S_{px}$  способствует возрастанию этого значения.

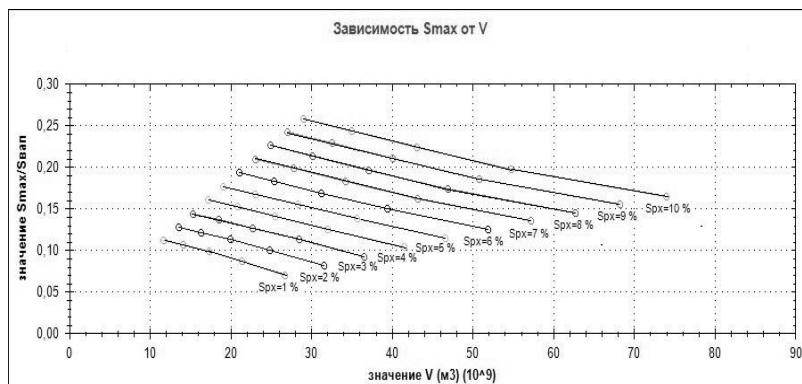


Рис. 6. Зависимость максимального значения площади затопления от объема гидрографа при фиксированном  $S_{px}$

Рис. 6 говорит о том, что увеличение объема паводкового гидрографа влечет за собой увеличение максимального значения площади затопления при фиксированном  $Q$ .

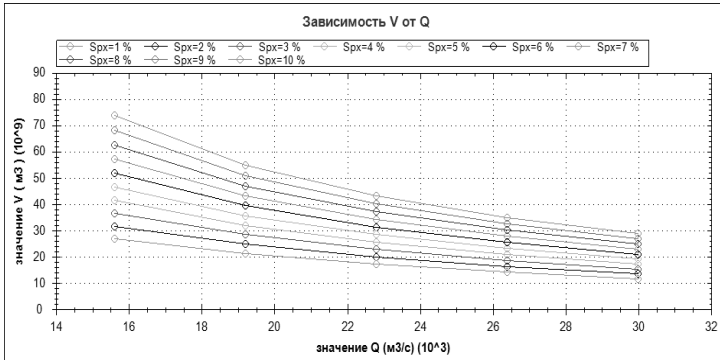


Рис. 7. Зависимость объема гидрографа от среднесуточного расхода воды при фиксированном  $S_{px}$

Из зависимостей, представленных на рис. 3.1.8, можно сделать вывод, что увеличение расхода воды ведет к уменьшению объема паводкового гидрографа.

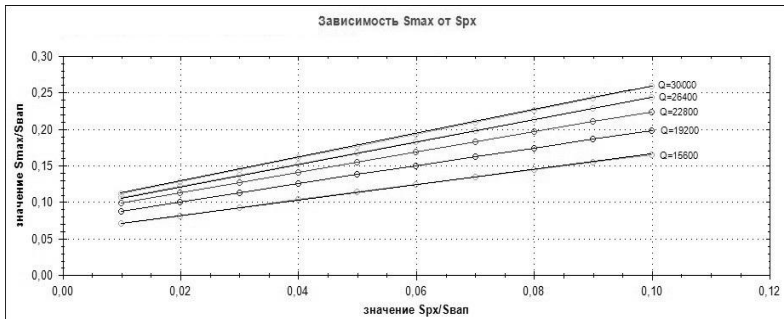


Рис. 8. Зависимость максимального значения площади затопления от площади нерестилищ при фиксированном  $Q$

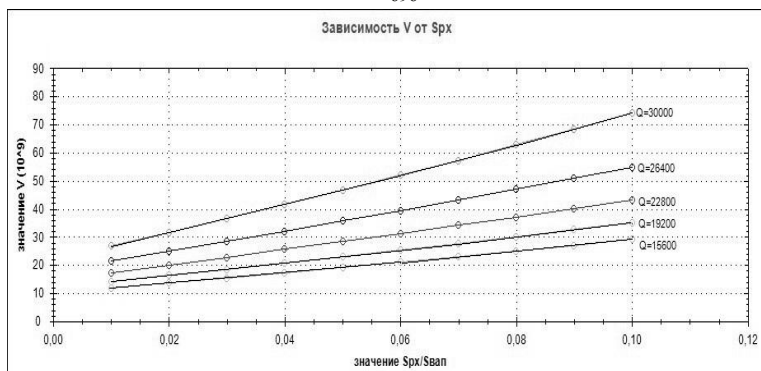


Рис. 9. Зависимость объема паводкового гидрографа от площади нерестилищ при фиксированном  $Q$

Из зависимостей, представленных на рисунках 8 и 9, можно сделать вывод, что уменьшение площади нерестилищ ведет к уменьшению объема паводкового гидрографа и к уменьшению площади затопления.

Также в ходе работы были построены зависимости площади затопления от времени при фиксированных значениях  $Q$  и  $S_{px}$ , представленные на рис. 10 и рис. 11.

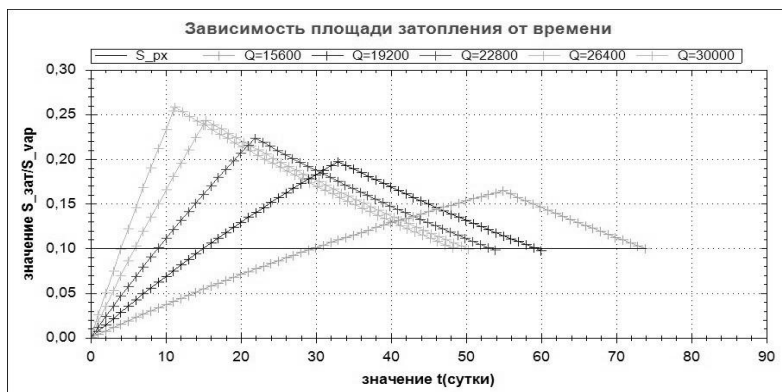


Рис. 10. Зависимость площади затопления от времени,  $S_{px}=10\%$   
 $S_{ВАП}$ ,  $T_{px}=45$

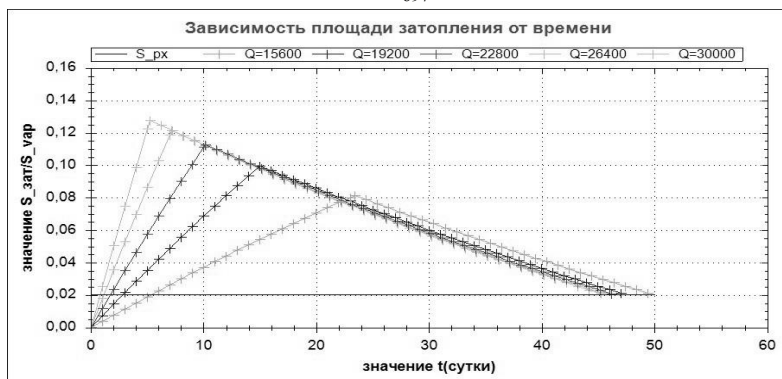


Рис. 11. Зависимость площади затопления от времени,  $S_{px}=2\%$   
 $S_{BAП}$   $T_{px}=45$

Также была построена зависимость периода затопления от среднесуточного расхода воды, представленная на рис. 12.

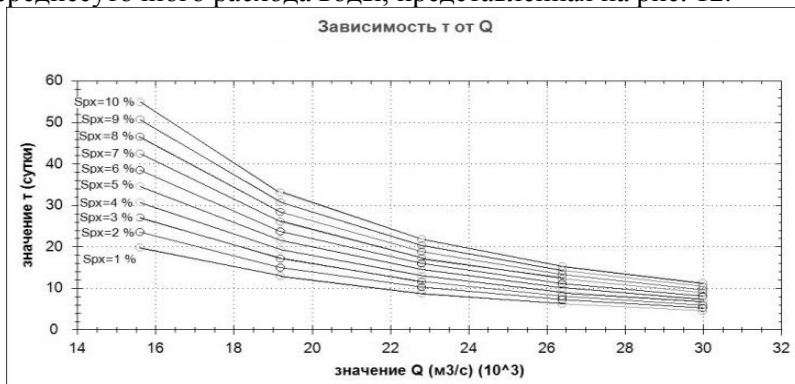


Рис. 12. Зависимость времени затопления от расхода воды при фиксированном  $S_{px}$

Вывод: в одноступенчатом гидрографе задание переменных  $Q$ ,  $S_{px}$ ,  $T_{px}$ ,  $S_{max}$  однозначно определяет гидрограф  $G=\{Q_1, \tau_1\}$ , а также значения  $V$  и  $S_{зат}$ . Также видно, что параметрами задачи являются величины  $S_{px}$  и  $V$ , а значение  $S_{зат}$  рассчитывается автоматически в зависимости от них.

Анализируя полученные результаты, можно построить Парето-оптимальное множество решений задачи [6].

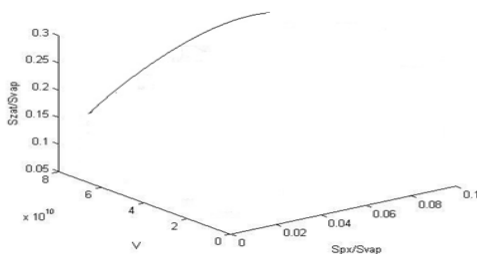


Рис. 13. Парето-оптимальное множество решения задачи 6-10

В реальной жизни одноступенчатые гидрографы используются довольно редко в силу резко изменяющихся погодных условий, поэтому необходимо рассмотрение двухступенчатых гидрографов.

Поиск оптимального двухступенчатого гидрографа проводится аналогично поиску одноступенчатого гидрографа. Изменяя  $\tau_1$  от максимального до минимального значения с некоторым шагом, получаем множество возможных пар  $Q_2, \tau_2$ . Множество  $G=\{Q_1, Q_2, \tau_1, \tau_2\}$  является решением задачи поиска оптимального двухступенчатого гидрографа.

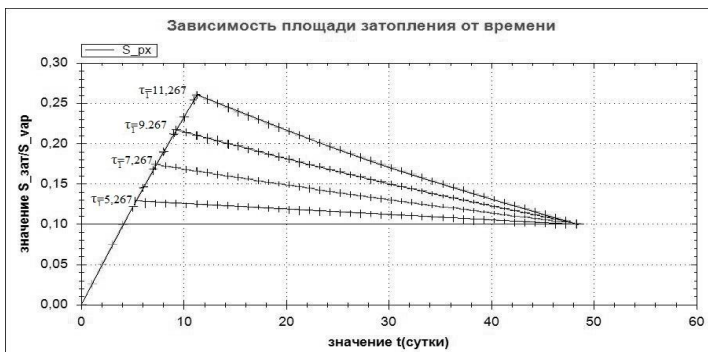


Рис. 14. Зависимость площади затопления от времени,  $S_{\text{px}}=10\%$   
 $S_{\text{вп}}$ ,  $T_{\text{px}}=45$  при фиксированном  $\tau_1$



При  $Q_2=0$  значение  $\tau_1$  получается максимальным и значение  $\tau_2=T$ , то есть оптимальный двухступенчатый гидрограф совпадает с оптимальным одноступенчатым гидрографом. В остальных случаях, по сравнению с одноступенчатым гидрографом, график зависимости площади затопления от времени имеет излом в точке  $\tau_2$  (рис. 3.15).

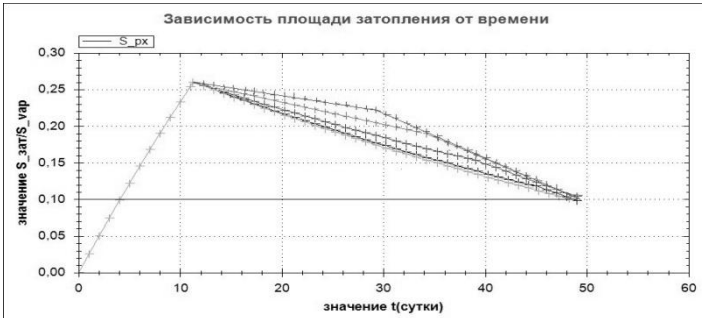


Рис. 15. Зависимость площади затопления от времени,  $S_{px}=10\%$  СВАП,  $T_{px}=45$ ,  $\tau_1=11,267$ ,  $\tau_2=45,39,34,29$  (снизу вверх)

В ходе решения были построены следующие зависимости:

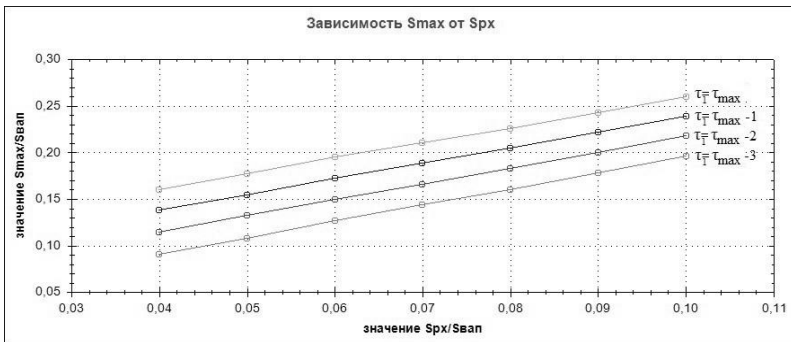


Рис. 16. Зависимость площади затопления от площади нерес-  
тилицы

Из анализа изображений 16 и 17 следует, что увеличение площади затопления сопровождается увеличением значений  $S_{px}$  и  $V$ .

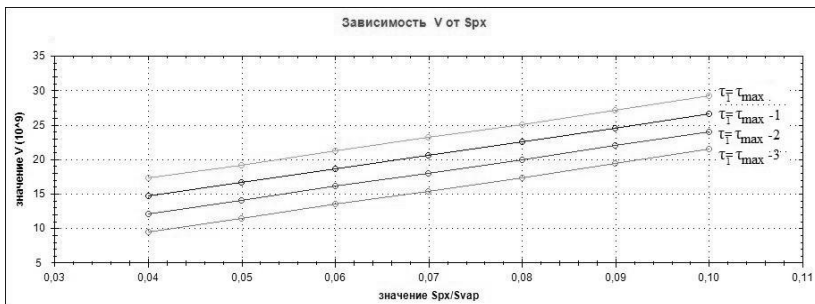


Рис. 17. Зависимость объема паводкового гидрографа от площади нерестилищ

Можно сделать вывод, что при увеличении площади нерестилищ объем паводкового гидрографа возрастает (он также возрастает при увеличении периода затопления).

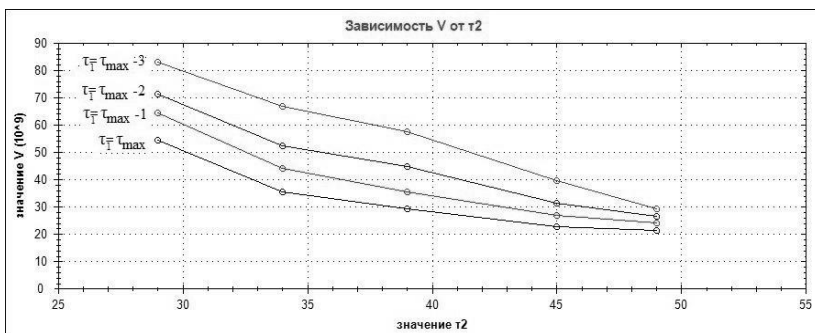


Рис. 18. Зависимость V от  $\tau_2$  при  $S_{px}=10\%S_{vap}$

Анализ изображения 18 приводит к следующему выводу: увеличение периода слива служит причиной возрастания расхода воды  $Q_2$  и объема паводкового гидрографа V.

Вывод: если основным критерием считать величину площади затопления, то двухступенчатый гидрограф более оптимальный при приближении к одноступенчатому. В случае невозможности использования одноступенчатого гидрографа, необходимо использовать максимальный период затопления ( $\tau_1$ ) при одновременном увеличении периода слива. Если критерий минимизации объема паводкового гидрографа считать более важным по

сравнению с критерием максимизации площади затопления, то оптимальное значение гидрографа достигается при уменьшении периода затопления при фиксированных рыбохозяйственных параметрах. Увеличение площади затопления для двухступенчатого гидрографа сопровождается приближением к одноступенчатому, в предельном случае (площадь затопления одинакова для обоих гидрографов) двухступенчатый и одноступенчатый гидрографы совпадут.

## 5. Заключение

Результаты численного исследования моделей паводкового гидрографа показали, что отклонение от  $Q_{\max}$  приводит к менее эффективному затоплению территории ВАП.

Применение гидрографов, описанных в настоящей работе, могло бы существенно снизить негативные тенденции к развитию Волго-Ахтубинской поймы. В дальнейшем построенная модель будет использована для уточнения коэффициентов когнитивной динамики и для математического моделирования механизмов управления гидрологическим ущербом в социоприродохозяйственной системе «Волжская ГЭС – Волго-Ахтубинская пойма».

## Литература

1. *Анализ экологических последствий эксплуатации Волгоградского водохранилища для сохранения биоразнообразия основных водно-болотных территорий Нижней Волги* / Отчет о НИР ФГУ «ГОИН». – М., 2010. – 675 с.
2. ВОРОНИН А.А., ЕЛИСЕЕВА М.В., ХРАПОВ С.С., ПИСАРЕВ А.В., ХОПЕРСКОВ А.В. *Задача управления гидрологическим режимом в эколого-экономической системе «Волжская ГЭС - Волго-Ахтубинская пойма»*. Ч. 2. Синтез системы управления // Проблемы управления. - 2012. - № 6. - С. 19 - 25.
3. МАКСИМОВ В.И., КОРНОУШЕНКО Е.К. *Аналитические основы применения когнитивного подхода при решении сла-*

*боструктурированных задач.*// Труды ИПУ РАН. - М., 1999. – Т. 2. – С.95-109.

4. ХОПЕРСКОВ А.В., ХРАПОВ С.С., ПИСАРЕВ А.В., ВОРОНИН А.А., ЕЛИСЕЕВА М.В., КОБЕЛЕВ И.А. *Задача управления гидрологическим режимом в эколого-экономической системе «Волжская ГЭС - Волго-Ахтубинская пойма»: Моделирование динамики поверхностных вод в период весеннего паводка* // Проблемы управления. - 2012. - N.5. - С. 18 - 25.

## **COGNITIVE ANALYSIS AND NUMERICAL RESEARCH THE MODELING OF OPTIMAL STATIONARY FLOOD HYDROGRAPH SOCIAL NATURAL MANAGEMENT OF SYSTEM "VOLGA HPP-VOLGA-AKHTUBA FLOODPLAIN"**

**Podschipkova Julia**, Volgograd State University, Volgograd, student (podschipkova1993@mail.ru).

*As a result, cognitive analysis social natural management of system "Volga HPP - Volga-Akhtuba floodplain" problem is formulated conditional multiobjective optimization flood hydrograph Volga hydroelectric power station on the set of stationary hydrograph. Developed and implemented a numerical algorithm for constructing a Pareto-optimal set of solutions to this problem using the analytical relationships describing the flood hydrology of the Volga-Akhtuba floodplain. This model can serve as a basis for solving the problem of environmental-economic management social natural management of system "Volga HPP - Volga-Akhtuba floodplain."*

**Keywords:** social natural management of system, flood hydrograph, multicriteria optimization, cognitive analysis.