

УДК 519.6;519.8

ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ В ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ «ВОЛЖСКАЯ ГЭС — ВОЛГО-АХТУБИНСКАЯ ПОЙМА". Ч. 2. Синтез системы управления

А.А. Воронин, М.В. Елисеева, С.С. Храпов, А.В. Писарев, А.В. Хоперсков

На основе результатов гидродинамического моделирования динамики поверхностных вод и когнитивного анализа эколого-экономической системы «Волжская ГЭС — Волго-Ахтубинская пойма» построены оптимизационная модель ее паводкового гидрологического режима и теоретико-игровая модель управления экономическим агентом с механизмом платы за ущерб.

Ключевые слова: эколого-экономическая система, управление риском, многокритериальная оптимизация, иерархическая игра.

ВВЕДЕНИЕ

Современный гидрологический режим экологоэкономической системы (ЭЭС) «Волжская ГЭС — Волго-Ахтубинская пойма» (ВГЭС — ВАП), определяемый хозяйственно-экономическими приоритетами, ведет к прогрессирующему обезвоживанию Волго-Ахтубинской поймы [1]. Кардинально изменить негативную природную динамику ЭЭС невозможно без создания комплексной системы эколого-экономического управления, задача которого состоит в оптимальном распределении ее водного ресурса на непосредственное хозяйственно-экономическое и опосредованное — через природу — потребление в условиях конкуренции ее акторов в краткосрочной и общности их интересов в долгосрочной перспективе, неопределенности гидрологического режима волжского бассейна и природной динамики ВАП.

Результатом адаптации комплекса механизмов управления [2, 3] для системы ВГЭС — ВАП должна стать система эколого-экономического управления гидрологическим режимом ВАП, включающая в себя: в природной и технической системах — синтез и реализацию оптимального режима расхода воды через водосброс ГЭС (гидрографа), восстановление природной и создание искусственной гидросистемы ВАП (строительство паводковых дамб в руслах рек, расчистка естественных ериков, восстановление родников и озер, прокладка кана-

лов, шлюзов, коллекторов); в социально-экономической системе - механизмы управления экономическим агентом (ЭА) — руководством ВГЭС, юридическое разделение субъектов и объектов управления, экологическое законодательство. Системообразующей задачей этого комплекса является синтез механизмов управления гидрологическим риском, возникающим в результате весеннего попуска воды через ВГЭС. В настоящей работе представлена модель управления паводковым гидрологическим режимом ВАП (в пределах Волгоградской области), включающая в себя оптимизацию гидрографа через створ Волжской плотины и механизм управления ЭА с расчетом платы за ущерб на основе аналитической аппроксимации результатов гидродинамического моделирования затопления ВАП [3].

1. КОГНИТИВНЫЙ АНАЛИЗ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ

Анализ основных страт эколого-экономической системы ВГЭС — ВАП позволяет построить иерархию ее гидрологических приоритетов — критериев управления гидрологическим режимом. Высшим гидрологическим приоритетом ЭЭС является безопасность ВГЭС, достигаемая поддержкой уровня Волгоградского водохранилища в заданном диапазоне. Это требование безопасности, заставляющее снижать его уровень перед весен-



ним снеготаянием и не опускать его ниже нормы в условиях переменного и не всегда верно прогнозируемого режима половодья, часто приводит к недостаточной суммарной емкости паводкового гидрографа Q(t). С другой стороны, этот же приоритет в условиях высокой воды может помешать реализации следующего приоритета — гидрологической безопасности жителей ВАП, определяемой безопасным режимом затопления (max $Q(t) \leq Q_{\text{max}}$) и предельно допустимым значением ее затопляемой площади ($\max_{t} S(t) = S_{\max} \leqslant S_{\text{пред}}$). Экологическая безопасность в краткосрочной перспективе, определяющая минимально допустимый уровень паводкового затопления (а, значит, и минимальный гидрограф), определяется рыбохозяйственным (рх) режимом — затоплением нерестилищ (площади $S_{\rm px}$) в течение периода нереста $T_{\rm px}$. (Значение $S_{\rm px}$ медленно, но неуклонно снижается, однако в краткосрочной перспективе ее сохранение является экологическим приоритетом.) Долгосрочная экологическая безопасность ЭЭС — сохранение природной системы ВАП — реализуется в краткосрочной перспективе максимизацией па-

водкового затопления ее поверхности $S_{\max} \to \max_{\alpha}$. Социальный гидрологический приоритет всех акторов ЭЭС в условиях безопасного затопления ВАП совпадает с экологическим. Экономический приоритет ЭЭС состоит из экономических приоритетов ее акторов, конкурирующих между собой и с природой ВАП за водный ресурс. Так, например, экономический приоритет ЭА — максимизация суммарного расхода воды через турбины ВГЭС — достигается минимизацией объема паводкового гидрографа, что противоречит реализации экономического приоритета жителей ВАП (также совпадающего с безопасным экологическим приоритетом). Таким образом, главная внутренняя проблема ЭЭС состоит в конфликте между экономическим приоритетом ЭА и ее экологическим приоритетом.

Система управления гидрологическим режимом ВГЭС является трехуровневой: Центр (межведомственная комиссия Министерства природных ресурсов с участием органов региональной власти) — ЭА — техническая система попуска ВГЭС). Гидрологическим приоритетом Центра служит баланс между гидроэнергетическим (F) и безопасным экологическим (U) критериями, качественная зависимость которых от затопляемой площади представлена на рис. 1. Парето-оптимальное множество планируемых Центром значений затопляемой площади $S_{\text{max}}^{\text{пл}}$ представлено на рис. 1 отрезком OB.

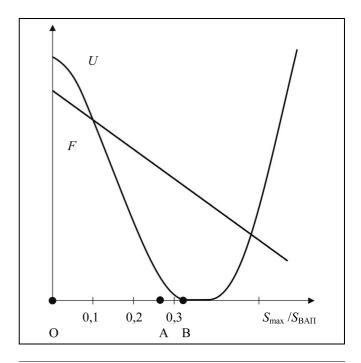


Рис. 1. Качественный вид функции гидрологического ущерба $\it U$ и гидроэнергетической полезности $\it F$

Таким образом, синтез оптимального механизма управления гидрологическим режимом включает в себя решаемую Центром задачу многокритериальной оптимизации (решением которой является плановый гидрограф), решаемую ЭА задачу оптимизации рх-гидрографа с безопасным экономическим критерием (решением которой является его оптимальное действие в отсутствие механизма экологического управления) и задачу эколого-экономического управления в системе «Центр — ЭА» с платой за ущерб.

2. МОДЕЛЬ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА

Наличие гидрологической модели [4] позволяет задавать гидрологический режим в виде кортежа $GR(t) = \{Q(t_0,t),\,\xi(t_0),\,\vartheta(t_0)\}$, где t_0 — время начала попуска, $\xi(t_0)$ — глубина оттаявшего грунта, $\vartheta(t_0)$ — состояние гидросистемы и рельефа ВАП (значения относительных высот и глубин на координатной сетке). Агрегированный гидрологический риск рассчитывается по формуле $IR = \sum_{GR} P(GR) U(GR)$, где P — вероятность, U — интегральный гидрологический ущерб. Необходимая для синтеза управления структура IR [2] определяется возможностью оценки локальных рисков и идентификации их субъектов.

Фактический гидрологический режим является результатом действий нескольких агентов. Сначала

20



на основе данных метеопрогноза и мониторинга определяются плановые значения $\xi_{\text{пл}}(t_0)$ и $\vartheta_{\text{пл}}(t_0)$, на основе которых региональная экологическая служба представляет Центру экологически оптимальный гидрограф $Q_{_{>K}}(t_0, t) = \arg \min(U_{_{>K}}(Q(t_0, t))),$ где $U_{\rm эк}$ — экологический ущерб. Центр, решая, например, задачу $U-F o \min_{Q(t)}$ (ее решению соответствует точка A на рис. 1) или применяя иной метод решения многокритериальной задачи [2] в условиях прогноза паводкового режима и оперативных данных о наполнении Волгоградского водохранилища, определяет плановый гидрограф $Q_{\text{пл}}(t_0, t)$. Экономический агент реализует фактический гидрограф $Q_{\Phi}(t_0, t)$, что соответствует гидрологическому режиму $GR(Q_{\phi}(t_0, t), \xi_{\Pi \Pi}(t_0), \vartheta_{\Pi \Pi}(t_0))$ Наконец, фактические природные условия и рельеф приводят к реализации гидрологического режима $GR(Q_{\Phi}(t_0, t), \xi_{\Phi}(t_0), \vartheta_{\Phi}(t_0))$. Отметим, что антропогенные изменения рельефа 9 могут играть как негативную, так и позитивную роль (в настоящей работе они используются как компенсирующие действия ЭА при $Q_{\dot{\Phi}} \leq Q_{\mbox{\tiny ПЛ}}$). Доля привносимого ЭА ущерба оценивается разностью

$$\begin{split} U_{\text{9A}} &= \textit{U}(\textit{GR}(\textit{Q}_{\varphi}(t_0, \, t), \, \xi_{\text{nn}}(t_0), \, \vartheta_{\varphi}(t_0))) \, - \\ &- \textit{U}(\textit{GR}(\textit{Q}_{\text{nn}}(t_0, \, t), \, \xi_{\text{nn}}(t_0), \, \vartheta_{\text{nn}}(t_0))). \end{split}$$

Расчет ущерба U по методике [2, 5] предполагает его предварительную реструктуризацию по видам (социальный, экологический, экономический, безопасность), акторам ЭЭС, времени действия и территории ВАП. Приоритетность видов территориально локализованных ущербов можно определить с учетом типа биосферных зон ВАП [6] (рис. 2). Отметим, однако, что реализация этого подхода в полном объеме в ближайшей перспективе затруднительна. Алгоритмически ясны расчеты и агрегирование территориально локализованных краткосрочных ущербов переходной зоны ВАП, главную часть которых составляет падение оценок прямой стоимости сельхозугодий и стоимости проживания, затраты на восстановление древесных насаждений и т. п. Оценка же и агрегирование (в особенности средне- и долгосрочного) в первую очередь, в методическом отношении. Сложность оценивания даже территориально локализованного ущерба $U_{\rm эк}$ обусловлена относительной природной неустойчивостью и слабой изученностью геобиоценоза ВАП, трудностью разделения действующих факторов наряду со скудностью статистических данных и нелинейным накопительным характером природных изменений. Экспертно-эмпирической базой этой оценки в будущем могут стать временные ряды полей коэф-

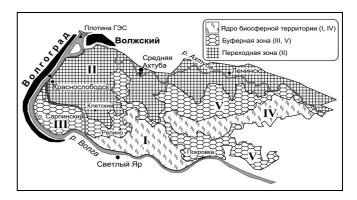


Рис. 2. Границы биосферных зон северной части ВАП (символом ▼ отмечено положение гидрологического поста в поселке Средняя Ахтуба)

фициентов биологической целостности и экологической значимости микрозон ВАП, к расчету которых приступили совсем недавно [1].

В настоящее время отсутствует общепринятая методика расчетов средне- и долгосрочных экологических ущербов. Можно лишь говорить об экспоненциальном виде верхней оценки определяющей ущерб зависимости сложности большого биоценоза (как системы биоценозов различной сложности и территориальной локализации) от площади компактно занимаемого им биотопа и об аддитивном агрегировании его сложности по изолированным биотопам. Поэтому при не слишком большом отклонении плановой площади затопления ВАП от фактической функция ущерба слабо отличается от линейной ($U_{\text{ЭА}}(\Delta S) = k\Delta S$, $\Delta S = S_{\text{max}}^{\text{пл}} - S_{\text{max}}^{\phi}$, $k \geqslant k_0 > 0$). Действительно, с

 $\Delta S = S_{\max}^{ss} - S_{\max}^{ss}, \ k \ge k_0 \ge 0$). Действительно, с одной стороны, плановый ущерб не равен нулю $(k_0 \ge 0)$, с другой, — расположение «внеплановых» сухих зон при значительном затоплении носит анклавный характер. В настоящей работе рассматривается функция ущерба общего вида с положительной первой производной при всех значениях аргумента.

3. МОДЕЛЬ ЗАТОПЛЕНИЯ ВОЛГО-АХТУБИНСКОЙ ПОЙМЫ

Для моделирования аналитической зависимости $S_{\rm зат}(h)=\max_t S(h(Q(t_0,t)))$ на основе визуального анализа картографических данных и результатов гидродинамического моделирования [4] были созданы двухзонная модель рельефа северной части ВАП (низменности и холмы с удельными весами площадей зон соответственно $\mu_1=0.7$ и $\mu_2=0.3$ и высотой холмов H=4 м) и двухуровневая модель ее гидросистемы (магистральная — крупные проточные русла и локальные — ветвящиеся ерики,



моделируемые бинарными деревьями со средним числом ветвлений g = 2,25, длиной каждого русла 6 км и уклоном дна $\alpha = 0,0006$. Предполагалось, что русла перекрыты природными дамбами с функцией равномерного распределения относитель-HUMN BLICOT $f(h, v) = \delta(v_0 + v) + (1 - \delta(v_0 + v))h/h_0$ где v_0 и v — затраты на расчистку дамб соответственно прошлых лет и текущего года, δ — коэффициент эффективности затрат, h_0 — максимальная высота дамб, h — высота превышения уровня паводковых вод над меженным в магистральной гидросистеме, и что $S_{\text{зат}}(0, 0) = 2,1 \cdot 10^8 \text{ м}^2 - \text{пло-}$ щадь ериков и озер, N = 32 — число локальных гидросистем, l = 1000 м — максимальная дальность разлива вод из каждого ерика. В рамках этих моделей функцию площади территории, затопляемой из русел локальной гидросистемы, можно записать в виде легко вычисляемой квадратуры:

$$\begin{split} S_{\text{3aT}}(h, v) &= S_{\text{3aT}}(0, 0) + \int_{0}^{h/\alpha} \phi(x, v) dx, \ h \leq h_{0}, \\ S_{\text{3aT}}(h, v) &= S_{\text{3aT}}(0, 0) + \int_{0}^{(h-h_{0})/\alpha} \theta(x) dx + \\ &+ \int_{(h-h_{0})/\alpha}^{h/\alpha} \phi(x, v) dx, \quad h \geq h_{0}, \end{split}$$

где $\phi(x, v) = f(h - \alpha x, v)\theta(x)$, $\theta(x) = Nle^{\gamma x}(\mu_1 + \mu_2(h - \alpha x)/H)$, $\gamma = 0.001gln2$. Техническая система по-

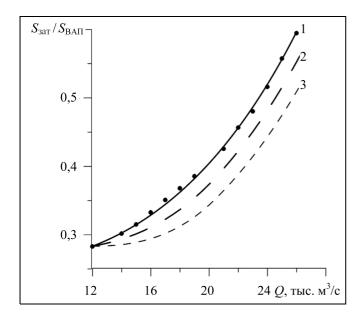


Рис. 3. Зависимости (1); точками обозначены результаты гидродинамических расчетов

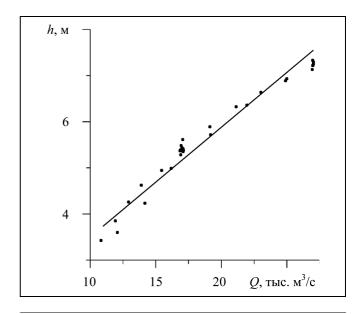


Рис. 4. Зависимость h(Q) по данным гидропоста в поселке Средняя Ахтуба (2010 г.) и их линейная аппроксимация

пуска ограничивает гидрограф $Q(t_0, t)$ суперпозицией линейных (рост, падение) и постоянных функций, но фактически варьируемыми параметрами служат величины и времена действия стационарных составляющих $Q(t_0, t) = Q = \text{const} [4]$.

На рис. 3 представлены кривые (1) при $h_0=2$ м, $\delta(v_0+v)=[1;\ 0.5;\ 0]$ (кривые $I,\ 2$ и J), $h(Q)=(Q-Q_0)/d,\ Q_0=12$ тыс. ${\rm M}^3/{\rm c}$ (начало затопления территории ВАП), d=4200 (с/ ${\rm M}^2$) (отвечает наилучшей аппроксимации функцией $h(Q)=(Q-Q_0)/d$ данных замеров превышения уровня р. Ахтуба над меженным на гидропосту п. Средняя Ахтуба в 2010 г., рис. 4). Для сравнения на рис. 3 точками отмечены значения $S_{\rm max}$, полученные прямым гидродинамическим моделированием затопления ВАП при стационарных гидрографах для f=1.

4. МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО ГИДРОГРАФА

С учетом изложенного в § 1 задачу максимизации экономического критерия ЭА на множестве безопасных рх-гидрографов можно записать в виде:

$$J = \int_{t_0}^{t_0 + T} Q(t)dt \to \min_{Q(t)}, \quad T = t_1 - t_0 + T_{px},$$

$$\max_{t} Q(t) \leq Q_{max}, \quad S_{max} \leq S_{mpeq}(t_0 < t < t_0 + T),$$

$$\min_{t} (S(t)) \geq S_{px}(t_1 \leq t \leq t_1 + T_{px}),$$

$$S(t_1) = S(t_0 + T) = S_{px}.$$
(2)



Решение этой задачи прямым гидродинамическим моделированием чрезвычайно трудоемко. Поэтому на основе формулы (1) была построена аналитическая аппроксимация полученных в работе [4] расчетных кривых S(t, Q(t)) затопления ВАП двухкаскадным стационарным гидрографом $Q(t) = Q_1$ ($t_0 \le t \le \tau$ — фаза подъема воды) и $Q(t) = Q_2$ ($\tau \le t \le t_0 + T$ — фаза спуска воды):

$$S(t, Q_{1}) = \frac{S_{\text{3aT}}(h(Q_{1}), v)(t/b(Q_{1}))^{n(Q_{1})}}{1 + (t/b(Q_{1}))^{n(Q_{1})}},$$

$$n(Q_{1}) = 0.1\sqrt[4]{Q_{1} - Q_{0}}, \quad b(Q_{1}) = \frac{2 \cdot 10^{5}}{Q_{1} - Q_{0}},$$

$$S(\tau) = S_{\text{max}};$$

$$S(t, Q_{2}, S_{\text{max}}) =$$

$$= S_{\text{max}} - \frac{S_{\text{3aT}}(h(\tilde{Q}), v)((t - \tau)/b(\tilde{Q}))^{n(\tilde{Q})}}{\left(1 + ((t - \tau)/b(\tilde{Q}))^{n(\tilde{Q})}\right)},$$

$$\tilde{Q} = h^{-1}(S_{\text{3aT}}^{-1}(S_{\text{max}})) - Q_{2} + Q_{0}.$$
(3)

3десь h^{-1} и S_{3 ат</sub> — обратные функции.

Для $T_{\rm px}=45,\ S_{\rm px}/S_{\rm BA\Pi}=0.1$ на рис. 5 приведены три расчетные кривые $S(t,\ Q(t))$ [4] (сплошные линии) и их аналитические аппроксимации

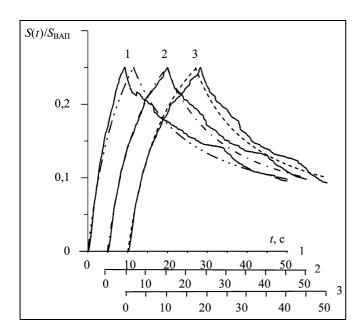


Рис. 5. Зависимость от времени площади затопленной территории ВАП для двухкаскадного гидрографа (по результатам гидродинамических расчетов [4] и их аппроксимаций (3))

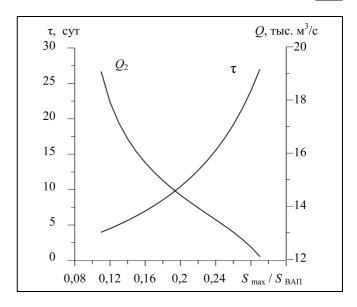


Рис. 6. Зависимости Q_2^* ($S_{
m max}$) и $au(S_{
m max})$ для рх-гидрографа при $Q_{
m max}=$ 28 тыс. м $^3/{
m c}$

(штриховые линии). Величины Q_1 и Q_2 для этих кривых соответственно равны: кривая I: 35 и 14,05; кривая 2: 34 и 13,38; кривая 3: 33 и 13,26. Найденное путем элементарных выкладок решение задачи (2), (3) для фазы затопления с параметром S_{\max} имеет вид: $Q_1^* = Q_{\max}$, $\tau(S_{\max}) = b(Q_{\max}) \Big(\frac{S_{\max}}{S_{\max} - S_{\max}(h(Q_{\max}), v)}\Big)^{1/n(Q_{\max})}$. Значение

 $Q_2^* = Q_2^*(S_{\max})$ находилось численно из краевого условия $S(t_1 + T_{px}, Q_2, S_{\max}) = S_{px}$. Для $T_{px} = 45$, $S_{px}/S_{\rm BA\Pi} = 0.1$ и $Q_{\max} = 28$ тыс. ${\rm M}^3/{\rm C}$ найденные значения ${\tau}(S_{\max})$ и $Q_2^*(S_{\max})$ приведены на рис. 6. Соответствующие этим функциям зависимости $J(Q_{\max})$, ${\tau}(S_{\max})$, $Q_2^*(S_{\max})$, построенные численно при $S_{px}/S_{\rm BA\Pi} = \{0.05; 0.1; 0.15\}$, приведены на рис. 7. Из последних зависимостей численно находилась величина $S_{\max}^* = \arg\min_{S_{\max}} (J(Q_{\max}), {\tau}(S_{\max}), Q_2^*(S_{\max}))$, которая и дает окончательное решение задачи (2), (3) — оптимальный рх-гидрограф $Q^* = \{Q_{\max}, {\tau}(S_{\max}^*), Q_2^*(S_{\max}^*)\}$.

Как показывает рис. 7, при $S_{\rm px}\approx (0,1-0,15)S_{\rm BA\Pi}$ величина $S_{\rm max}^*$ достигает экологически оптимальных значений $S_{\rm max}^*\approx (0,27-0,33)S_{\rm BA\Pi}$. Однако в настоящее время $S_{\rm px}\approx (0,05-0,07)S_{\rm BA\Pi}$, что соответствует значению $S_{\rm max}^*\approx (0,2-0,22)S_{\rm BA\Pi}$ — зна-

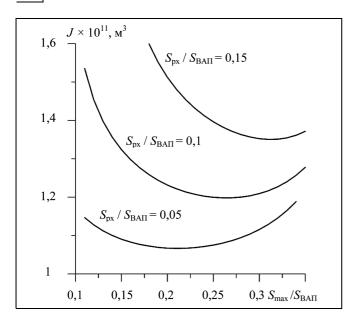


Рис. 7. Зависимость суммарной емкости паводкового рх-гидрографа от максимальной площади затопленной территории ВАП

чительно ниже значения $S_{\max}^{\Pi\Pi} = \arg\min_{Q(t)} (U - F)$ (точка A на рис. 1), что говорит об актуальности механизма эколого-экономического управления.

5. СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ РИСКОМ

Обозначим $y=(h_{\Pi\Pi}-h_{\varphi})/h_{\Pi\Pi},\ h_{\Pi\Pi}=h(S_{\max}^{\Pi\Pi}),$ $h_{\varphi}=h(S_{\max}^{\varphi}),\ U(y,v)=(U_{\ni A}(\Delta S(y,v)).$ Ввиду слабой зависимости затрат \ni A от объема выработки электроэнергии функция дополнительной прибыли \ni A может быть записана в виде $f_0=by$, где b— некоторое число.

Рассмотрим задачу управления в системе «Центр — ЭА» с механизмом платы за ущерб [2]:

$$\Phi_{\mathrm{II}}(y, v, \lambda) = U((y(\lambda), v(\lambda))) \rightarrow \min_{\lambda}$$

$$f(y(\lambda), v(\lambda)) = by - v - \lambda U(y(\lambda), v(\lambda)) \rightarrow \max_{(v, v)}$$
 (4)

с ценой ущерба λ . Для решения задачи (4) выражение (1) и функцию ΔS удобно записать в виде соответственно $S_{\text{зат}}(h, \nu) = S_{\text{зат}}(0, 0) + h\delta(\nu_0 + \nu)\phi_1(h) + h^2\phi_2(h), \quad \phi_i^{(n)}(0) > 0, \quad i = 1, 2, \quad n = 0, 1, \dots$ и $\Delta S = \psi_0(y) - \nu\psi_1(y)$. (Производные функций ψ_0 и ψ_1 положительны при всех значениях аргумента). При $\nu = \nu^0(y) = \psi_0/\psi_1$ имеем $\Delta S = 0$ и, соответственно, U = 0. На рис. 8 изображен график $\nu = \nu^0(y)$,

построенный численно с учетом выражения (1). Пусть $\delta v_0 < 1$. Обозначим

$$\begin{split} U_1 &= \min(\ U_y' \big|_{v \,=\, 0}), \quad U_2 = \min| \ U_v'(y, \ v) \big|, \\ y_{\max} &= \frac{1 - \delta v_0}{\delta b}, \quad \delta_{\min} = \frac{2 h_{\Pi\Pi} \phi_2(h_{\Pi\Pi})}{(b - v_0) \phi_1(h_{\Pi\Pi})}, \\ p &= \frac{\partial \psi_0}{\partial y} \bigg|_{y \,=\, 0} = \delta v_0 h_{\Pi\Pi} \phi_1(h_{\Pi\Pi}) + 2 h_{\Pi\Pi}^2 \phi_2(h_{\Pi\Pi}), \\ q &= \psi_1(0, \ h_{\Pi\Pi}) = \delta h_{\Pi\Pi} \phi_1(h_{\Pi\Pi}), \\ r &= \frac{\partial \psi_1}{\partial y} \bigg|_{y \,=\, 0} = \delta h_{\Pi\Pi} (\phi_1(h_{\Pi\Pi}) + \phi_1'(h_{\Pi\Pi})), \\ D &= \{(y, \ v, \ \lambda, \ \delta): \ 0 \leqslant y \leqslant y_{\max}, \ v = v^0(y, \ \delta, \ v_0), \\ \lambda &> \lambda_{\min}, \ \delta \geqslant \delta_{\min} \}. \end{split}$$

При $\lambda \geqslant \lambda_{\min} = \max(b \, U_1^{-1} \,,\, U_2^{-1})$ выполнены условия сильного штрафа [2] и $f_v' > 0$, поэтому при y > 0 для ЭА оптимально значение $v = v^0(y)$. При $(y, v, \delta, \lambda) \in D$ имеем $U = 0, f(y, v, \lambda) \geqslant 0$. Оптимальное для ЭА решение задачи (4) в области D имеет вид $y^*(\delta, v_0) = \arg\max_y f(y, v^0(y, \delta, v_0))$ (см. рис. 8). Заметим, что с ростом v_0 область D сужается и повышается порог эффективности восстановительных работ δ_0 .

Решение задачи (4) в линейном приближении имеет вид: $v_0(y, \delta, v_0) = \frac{py}{q-ry}, y^* = \frac{q^2 \varepsilon}{r(1+\varepsilon)},$ $v^0(y^*) = p\xi/r, f(y^*, v_0(y^*)) = p\varepsilon^2/r, \varepsilon = \sqrt{bq/p} - 1.$

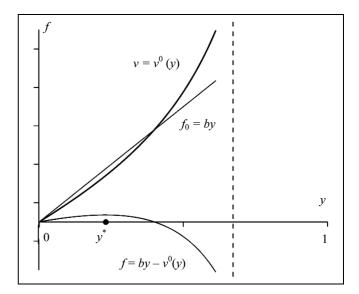


Рис. 8. Функции дохода $f_0=by$, затрат $v=v^0(y)$ и прибыли $f=by-v^0(y)$ экономического агента в режиме полной компенсации ущерба



Значение y=q/r отмечено на рис. 8 вертикальной штриховой линией. Если вместо труднооцениваемой функции экологического ущерба использовать его измеримый индикатор ΔS , то $\lambda_{\min} = b/p$ и, таким образом, все параметры механизма управления становятся определенными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Среди задач, решение которых необходимо для практической реализации построенного механизма управления и возможно на основе представленных в работе моделей и результатов, отметим количественную оценку и уточнение параметров построенного механизма управления на основе реальных данных; моделирование гидрологических последствий фактических антропогенных изменений гидросистемы и рельефа Волго-Ахтубинской поймы; расширение перечня и оценку эффективности компенсирующих действий экономического агента (строительство каналов и гидросооружений, предназначенных для экологической оптимизации гидрологического режима Волго-Ахтубинской поймы) синтез экологически оптимального гидрологического режима волжского гидрокаскада и неманипулируемых механизмов управления всеми участниками процесса синтеза гидрографа.

В 2011 г. принято решение о выделении средств Федерального бюджета на восстановление гидросистемы Волго-Ахтубинской поймы. Как показано в настоящей работе, внедрение механизма эколого-экономического управления экономическим агентом могло бы существенно повысить эффективность их использования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-07-97025), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2009—2013 гг.» (проект № 14.В37.21.028), Минобрнауки (тема «Системы мониторинга, диагностики и управления в экологии и медицине на основе инфор-

мационных технологий и компьютерного моделирования»).

Авторы благодарны НИВЦ МГУ им. М.В. Ломоносова за предоставленную возможность воспользоваться суперкомпьютером «Ломоносов».

ЛИТЕРАТУРА

- Анализ экологических последствий эксплуатации Волгоградского водохранилища для сохранения биоразнообразия основных водно-болотных территорий Нижней Волги // Отчет о НИР ФГУ «ГОИН» / И.В. Землянов, О.В. Горелиц, А.Е. Павловский и др. М., 2010. 675 с.
- 2. *Бурков В.Н., Новиков Д.А., Щепкин А.В.* Механизмы управления эколого-экономическими системами / под ред. акад. С.Н. Васильева. М.: Физ.-мат. лит., 2008. 244 с.
- 3. *Угольницкий Г.А., Усов А.Б.* Математическая формализация методов иерархического управления эколого-экономическими системами // Проблемы управления. 2007. № 4. С. 64—69.
- Хоперсков А.В., Храпов С.С., Писарев А.В. и др. Задача управления гидрологическим режимом в эколого-экономической системе «Волжская ГЭС Волго-Ахтубинская пойма». Ч. 1. Моделирование динамики поверхностных вод в период весеннего паводка // Проблемы управления. 2012. № 5. С. 18—25.
- Губко М.В. Механизмы оценки безопасности заповедника // Управление большими системами. — 2008. — № 21. — С. 131—144.

Статья представлена к публикации членом редколлегии чл.-корр. РАН Д.А. Новиковым.

Воронин Александр Александрович — д-р физ.-мат. наук, профессор, **☎** (8442) 46-02-61, ⊠ voronin@volsu.ru,

Елисеева Мария Владимировна — магистрант, ☎ (8442) 46-02-61,

Храпов Сергей Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, доцент, **☎** (8442) 46-48-94,

Писарев Андрей Владимирович — аспирант, **☎** (8442) 46-48-94, ⊠ andrew pisarev@mail.ru,

Хоперсков Александр Валентинович — д-р физ.-мат. наук, профессор, **☎** (8442) 46-48-94, ⊠ khoperskov@rambler.ru,

Волгоградский государственный университет, кафедра информационных систем и компьютерного моделирования.

Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Рефлексия и управление: математические модели. — М.: Изд-во физ.-мат. литературы, 2013. — 412 с., ISBN 978-5-94052-226-3.



Монография посвящена обсуждению современных подходов к математическому моделированию рефлексивных процессов в управлении. Рассмотрены рефлексивные игры, описывающие взаимодействие субъектов (агентов), принимающих решения на основании иерархии представлений, во-первых, о существенных параметрах (информационная рефлексия), во-вторых — о принципах принятия решений оппонентами (стратегическая рефлексия), а также представлений о представлениях и т. д.

Анализ поведения фантомных агентов, существующих в представлениях других реальных или фантомных агентов, и свойств информационной (и рефлексивной) структур, отражающих взаимную информированность реальных и фантомных агентов, позволяет предложить в качестве решения игры информационное (соответственно, рефлексивное) равновесие, которые являются обобщением ряда известных концепций равновесия в некооперативных играх и в моделях коллективного поведения.

Модели информационной и стратегической рефлексии дают возможность:

- описывать и изучать поведение рефлексирующих субъектов;
- исследовать зависимость выигрышей агентов от рангов их рефлексии;
- ставить и решать задачи информационного и рефлексивного управления в организационных, экономических, социальных и других системах, в военном деле и др. (в книге рассмотрено около 30-ти примеров прикладных задач из перечисленных областей);
- единообразно описывать многие явления, связанные с рефлексией: скрытое управление, информационное управление через СМИ, рефлексию в психологии, художественных произведениях и др.

Для специалистов в области принятия решений и управления системами междисциплинарной природы, а также для студентов вузов и аспирантов.