

**НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР  
МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЙ КООРДИНАЦИОННОЙ  
ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ КОМИССИИ  
(НИЦ МКВК)**



**РЕГИОНАЛЬНЫЕ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ:  
НОВЫЕ ПОДХОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ РЕШЕНИЯ**

**Сборник научных трудов**

*вып. 5*

Ташкент – 2001

В сборнике представлены результаты научно-исследовательских работ, выполненных сотрудниками Научно-информационного центра МКВК

Главный редактор  
д.т.н., профессор *Духовный В.А.*

Сборник подготовили к печати:  
*Соколов В.И., Беглов Ф.Ф., Пулатов А.Г.*

**СОДЕРЖАНИЕ**

<i>Духовный В.А., Тучин А.И.</i> УПРАВЛЕНИЕ ИРРИГАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ.....	4
<i>Сорокин А.Г.</i> ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ БАССЕЙНОВ РЕК .....	10
<i>Тучин А.И.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ОПОЛЗНЯМИ, В ОТКРЫТЫХ ВОДОЕМАХ.....	16
<i>Тучин А.И.</i> ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛНЫ ПРОРЫВА .....	30
<i>Авакян И.С.</i> ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ПРОДУКЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО СЕКТОРА В ЗОНЕ ПРИАРАЛЬЯ .....	34
<i>Чолпанкулов Э.Д., Инченкова О.П.</i> РАСЧЕТ ФАКТОРА СТРЕССА СЕЛЬХОЗКУЛЬТУР ИЗ-ЗА НЕДОПОДАЧИ ВОДЫ, ОСНОВАННОГО НА ИЗМЕРЕНИЯХ И С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ SCORWAT .....	42
<i>Пинхасов М.А.</i> ОПЫТ ОРГАНИЗАЦИИ, ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АССОЦИАЦИЙ ВОДОПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ.....	50
<i>Гловацкий О.Я., Коваленко Г.П., Талипов Ш.Г., Тий Л.В.</i> НОВЫЕ ПРОГРАММНЫЕ МОДУЛИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КРУПНЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ .....	55
<i>Беглов И.Ф., Гловацкий О.Я., Исаков Х.Х., Талипов Ш.Г.</i> АНАЛИЗ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ .....	60
<i>Беглов И.Ф.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОСЕВЫХ НАСОСОВ .....	65
<i>Хорст М.Г.</i> ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОРОСИТЕЛЬНОЙ ВОДЫ НА УРОВНЕ ПОЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММЫ SCORWAT .....	69

*Духовный В.А., Тучин А.И.*

## **УПРАВЛЕНИЕ ИРРИГАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ**

### **1. ХАРАКТЕРИСТИКА ИРРИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Ирригационная система представляет собой комплекс гидротехнических сооружений, организованных в виде ориентированной сети, и предназначенной для подачи требуемого объема водных ресурсов в заданные точки пространства и временные этапы с целью орошения сельскохозяйственных угодий. Роль проводников водных ресурсов выполняют системы каналов, как правило, различных конструкций, а роль временных регуляторов комплекс управляющих гидротехнических сооружений (плотин, затворов, водосливов, перегораживающих сооружений и т. п.). Требуемые объемы водных ресурсов и промежутки времени их подачи определяются площадями и набором сельскохозяйственных культур, техническим состоянием ирригационных систем, техникой орошения и характеристикой почв, на которых сельскохозяйственные культуры выращиваются. Ирригационные системы могут быть самотечными, с машинным водоподъемом или смешанного типа. Технические характеристики ирригационных систем обычно выражаются через значения максимальных и средних расходов, протяженность системы каналов, коэффициент полезного действия и размеры подкомандных площадей орошения. Экономическими характеристиками ирригационных систем служат удельные значения капитальных вложений на гектар орошаемой площади и на кубометр подаваемой воды и аналогичные удельные значения затрат, требуемых на поддержание функциональной способности ирригационной системы.

### **2. ПОКАЗАТЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИРРИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

Основными эксплуатационными характеристиками функционирования ирригационной системы, в соответствии с их назначением, являются:

- а) относительный объем потерь водных ресурсов,
- б) степень водообеспеченности подкомандных площадей.
- в) равномерность водообеспечения водопотребителей, подвешенных к системе.

Эти характеристики выражаются следующими отношениями: первая представляет собой двухкомпонентный вектор (КПД технический, КПД организационный), вторая – через отношение, фактически подаваемого объема водных ресурсов к требуемому, а третья - величиной разброса второй характеристики у каждого конкретного поля орошения. Эти характеристики функционирования ирригационной системы, отражают ее роль в мелиоративном комплексе. Для оценки собственной динамики изменения ирригационной системы в процессе эксплуатации используются относительные показатели, в виде соответствующих отношений фактических и проектных значений показателей или фактических и плановых, установленных на момент ввода в эксплуатацию системы [1].

### 3. ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ИРРИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Формальное описание движения воды в ирригационной системе основывается на так называемой камерной модели [2], [3], где область течения жидкости представляется набором элементарных емкостей, увязанных между собой комплексом гидротехнических сооружений, в виде ориентированного графа  $G(J,I)$ , где  $J = \{0, 1, \dots, j\}$  - множество вершин, соответствующих емкостным объектам ирригационной системы, а  $I = \{0, 1, \dots, i\}$  - множество дуг, отражающих связи по распределению водных ресурсов через гидротехнические сооружения. Каждый элемент  $i \in I$  характеризуется парой  $(j, k)$ , такой что  $(\forall (j, k), j \in J, k \in J, k \neq j)$ , где:  $j$  - начальная вершина (узел),  $k$  - конечная вершина (узел), дуги  $i$ . Таким образом, с каждой вершиной  $G$  связан некоторый объем воды, а с каждой дугой – расход этой воды между вершинами. На основе закона сохранения массы для каждой вершины можем написать уравнения:

$$\frac{dW_j}{dt} = \sum_{(k,j) \in I_j^+} Q_{k,j} - \sum_{(j,k) \in I_j^-} Q_{j,k} + q_j \quad (1)$$

$$Q_{j,k} = Q_{j,k}(a_{j,k}, W_j, U_{j,k}), \quad \forall (j,k) \in \{I^U\} \subset \{I\} \quad (2)$$

$$W_j(h_j) = \int_0^{h_j} \Omega_j(z) dz \quad (3)$$

$$q_j = q_j(W_j, t) \quad (4)$$

$$Q_{j,k}(t) \geq 0, \quad \forall (j,k) \in \{I\}; \quad W_j(t) \geq 0, \quad \forall j \in \{J\}, \quad t \in \{t^0 : t^K\} \quad (5)$$

где:  $W_j$  – объем воды в  $j$ -ой вершине ( $\text{м}^3$ );

$I_j^+, I_j^-$  - множества дуг входящих в вершину  $j$  и выходящих из вершины  $j$ , соответственно;

$q_j$  – локальный отток (приток) в вершину, отражающий различного рода потери, фильтрация, испарение и т. п. ( $\text{м}^3/\text{сек}$ );

$Q_{j,k}$  - расход между вершинами  $j$  и  $k$  ( $\text{м}^3/\text{сек}$ );

$a_{j,k}$  - функция, характеризующая конкретное гидротехническое сооружение, расположенное на дуге  $(j,k)$ ;

$U_{j,k}(t)$  – управление дугой  $(j,k)$ ;

$\{I^U\}$  - подмножество  $\{I\}$  управляемых дуг;

$\Omega_j(z)$  – площадь водного зеркала в вершине при отметке  $z$  ( $\text{м}^2$ );

$h_j$  – глубина воды в вершине ( $\text{м}$ );

$t$  – текущее время;

$t^0$  и  $t^K$  – начальное и конечное время процесса.

Полагая, что  $W_j(t^0)$  - известны, а  $U_{j,k}(t)$  - заданные функции для всего интервала времени  $\{t^0, t^K\}$ , для определения параметров течения воды в ирригационной системе мы получили задачу, известную как «задачу Коши». Для решения этой задачи перейдем к дискретному пространству по времени, интервал  $\{t^0 : t^K\}$  разобьем на равные промежутки  $\Delta t$  таким образом, что  $t$  теперь может принимать значения из множества  $\{t^0, t^0 + \Delta t, t^0 + 2\Delta t, \dots, t^0 + K\Delta t = t^K\}$ . Параметры системы в вершинах отнесем к моментам

времени  $t \in \{t^0, t^0 + \Delta t, t^0 + 2\Delta t, \dots, t^0 + K\Delta t\}$ , а параметры на дугах к моментам времени  $t \in \{t^0 + 0.5 \times \Delta t, t^0 + 1.5 \times \Delta t, t^0 + 2.5 \times \Delta t, \dots, t^0 + (K-0.5) \times \Delta t\}$ , тогда вместо (1) и (2) получим:

$$W_j^{t+1} = W_j^t + \sum_{(k,j) \in I_j^+} W_{k,j}^{t+1/2} - \sum_{(j,k) \in I_j^-} W_{j,k}^{t+1/2} + w_j^{t+1/2} \quad (6)$$

$$W_{j,k}^{t+1/2} = \Delta t \times Q_{j,k}(a_{j,k}, W_j^t, W_j^{t+1}, U_{j,k}^{t+1/2}), \forall (j,k) \in \{I^U\} \subset \{I\} \quad (7)$$

здесь:  $w_j = q_j \times \Delta t$ ;

Таким образом, система из  $2 \times |\{J\}|$  дифференциальных уравнений (уравнения (1) на дискретной временной сетке редуцируется в систему из  $2 \times (K+1) \times |\{J\}|$  - нелинейных алгебраических уравнений, относительно переменных в вершинах, связанных через  $2 \times K \times |\{I\}|$  - переменных на дугах, из которых  $K \times |\{I\}|$  - переменных являются управлениями). Здесь  $|\{\cdot\}|$  - количество элементов в указанном множестве. Дальнейшие преобразования связаны с вариантами реализации задачи на конкретном языке программирования, в данном случае используется GAMS.

#### 4. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Формулировку всех задач планирования и оптимального управления подачей водных ресурсов на орошение ирригационной системой, начнем с рассмотрения некоторой территории, охваченной контуром  $\partial G$ , внутри которого имеется множество  $\{J^L\}$  площадей орошения, на каждой из которых возделывается некоторое множество культур  $\{R\}$ , с параметрами:  $F_{r,j}$ ,  $q_{r,j}^N(t)$ ,  $\eta_j$ ,  $j \in \{J^L\}$ ,  $r \in \{R\}$ ,  $t \in \{T\}$ ; где:  $\{J^L\}$  – множество площадей орошения,  $q_{r,j}^N(t)$  - функция удельного водопотребления культурой “r”, с учетом всех агротехнических и климатических факторов,  $\eta_j$ - полный КПД j-ой площади орошения, соответственно,  $\{T\}$  – период времени управления  $\{T\} \in \{t^0, t^K\}$ . Данная территория покрыта множеством оросительных систем, забирающих воду из нескольких источников, причем часть этой воды поступает на собственные нужды, а часть, пропускается транзитом. Множество внешних источников, подающих воду на рассматриваемую территорию, обозначим через  $\{J^{inp}\}$ , а множество источников, получающих воду из нее воду, через  $\{J^{out}\}$ . Структуру ирригационной сети формализуем в соответствии с [3], обозначив через  $\{J^C\}$  – множество каналов всех ирригационных систем. Далее, связав с помощью ориентированных дуг, множества  $\{J^{inp}\}, \{J^C\}$  и  $\{J^L\}, \{J^{out}\}$ , получим граф  $G(J, I)$  орошения, исследуемой территории, где множество  $\{J\} = \{J^{inp}\} \cup \{J^C\} \cup \{J^L\} \cup \{J^{out}\}$ , и  $\{J^{inp}\} \cap \{J^C\} \cap \{J^L\} \cap \{J^{out}\} = 0$ . Каждая площадь орошения из подмножества  $\{J^L\}$  формирует следующие требования на подачу водных ресурсов:

$$Q_j(t) = \sum_{r \in \{R\}} F_{j,r} \times q_{r,j}^N(t) / \eta_j, \forall j \in \{J^L\}, t \in \{T\} \quad (8)$$

Кроме этого заданы требования к транзиту:

$$Q_j(t), \forall j \in \{J^{out}\}, t \in \{T\} \quad (9)$$

И известны гидрографы подачи водных ресурсов в контур орошения:

$$Q_{i,j}(t), \forall j(i,j) \exists [i \in \{J^{inp}\}, j \in \{J^C\}], t \in \{T\} \quad (10)$$

Если водные ресурсы в любой момент времени превышают плановую потребность в воде, то задачи ирригационной системы ограничиваются их распределением. В противном случае, ирригационная система работает в условиях дефицита водных ресурсов и помимо задачи распределения, возникает задача ограничения или урезки, как ее часто называют, в подаче водных ресурсов исходя из фактически складывающейся водохозяйственной обстановки. В существующей практике распределения водных ресурсов обычно используется равномерная урезка всех водопотребителей, однако, чтобы учесть возможность не равномерной урезки введем параметр приоритета водопотребителя в форме  $p_j(t) \geq 1$ , понятно, что чем выше значение  $p_j(t)$ , тем большим приоритетом пользуется  $j$ - й водопотребитель в момент времени  $t$ .

#### 4.1. Задача оперативного планирования

Будем считать, что течение воды в ирригационной системе подчиняется уравнениям (1)-(5). Введем величину:

$$\lambda_j(t) = p_j(t) / F_j, \quad (11)$$

здесь  $F_j$  - площадь подкомандного поля  $j$ -го водопотребителя.

И сформулируем следующую задачу оптимального распределения водных ресурсов на орошение:

$$\mathcal{N}(W_j(\bullet), U_{j,k}(\bullet)) = \sum_{j \in \{J^L\} \cup \{J^{out}\}} \int_{t^0}^{t^K} \lambda_j^2(t) \times (Q_j(t) - \sum_{(k,j) \in \{I^L\}} Q_{k,j}(t)) \times (\sum_{(k,j) \in \{I^L\}} Q_{k,j}(t) - Q_j(t)) dt \rightarrow \sup, \quad (12)$$

$$\psi(t^0, W_j(t^0), t^K, W_j(t^K)) = 0, \quad U_{j,k}(t) \in U_{j,k} \quad \forall [(j,k) \in \{I^U\}], t \in \{t^0 : t^K\} \quad (13)$$

Здесь:  $U_{j,k}(t)$  – управление дугой  $(j,k)$ ,  $\{I^U\}$ -подмножество  $\{I\}$  управляемых дуг (гидротехнических сооружений);

$U_{j,k}$  - допустимое пространство управлений;

$\psi$  - требования к ирригационным системам в начальный и конечный моменты времени.

Коэффициенты  $\lambda_j$ , когда  $\forall j \in \{J^{out}\}$ , отражают значимость транзита в рассматриваемом контуре  $\partial G$ . Для завершения формулировки задачи управления ирригационными системами в дифференциальной форме остается указать, среди каких функций будет искаться верхняя граница (**sup**) функционала (12). Задача (12)-(13) относится к классу задач оптимального управления с закрепленным временем, для которых допустимым решением является совокупность  $(W_j(\bullet), U_{j,k}(\bullet))$  при выполнении следующих требований:

вектор-функция  $U_{j,k}(\bullet)$  определена, и кусочно непрерывна на отрезке  $\{t^0 : t^K\}$ ;

для всех  $t \in \{t^0 : t^K\}$  выполняется условие (13);

функции  $W_j(\bullet)$  дифференцируемы во всех точках, кроме точек, где  $U_{j,k}(\bullet)$  терпит разрыв, во всех точках дифференцируемости выполняются (1);

выполняются граничные условия (13);

функции  $Q_j(t)$  и  $Q_{i,j}(t)$  определены и кусочно непрерывны на отрезке  $\{t^0 : t^K\}$ , (эти функции неуправляемы, поскольку характеризуют требования со стороны орошаемых площадей и транзита).

Именно среди таких допустимых решений будет искааться экстремум в задаче (12)-(13). Задача (12)-(13) называется задачей оперативного планирования водораспределением в ирригационных системах, на основе результатов которой, уточняются объемы подачи водных ресурсов в соответствии с выделенными лимитами и назначается режим работы гидротехнических сооружений.

#### 4.2. Задача оперативного управления

Следующим этапом в решении задач оптимального управления является корректировка плановых расходов в соответствии с реально складывающейся водохозяйственной обстановкой. Для этого общий временной интервал  $\{t^0:t^K\}$  разобьем на два непересекающихся интервала  $\{t^0:t^*\}$  и  $\{t^*:t^K\}$ , прошлое и будущее, соответственно. Все переменные, относящиеся к  $\{t^0:t^*\}$  являются известными, отражающими реальный график подачи и распределения водных ресурсов на орошение, который, будет отличаться от оптимального, полученного расчетным путем на этапе планирования по трем причинам:

- Отклонения в техническом распределении водных ресурсов внутри контура  $\partial G$ ,
- Отклонения в объемах фактической подачи водных ресурсов в контур  $\partial G$ ,
- Отклонения в требованиях  $Q_j(t)$  водных ресурсов внутри контура  $\partial G$ , обусловленные различными климатическими факторами.

Совокупность этих трех причин формирует внутриконтурный дисбаланс за период  $\{t^0:t^*\}$ , который приводит к необходимости корректировки плановых расходов в интервале времени  $\{t^*:t^K\}$ . Относительный дисбаланс для каждого элемента, рассматриваемого контура, и для каждого момента времени  $t^*$ ,  $\{t^0 < t^* < t^K\}$ , можно вычислить по формуле:

$$\alpha_j(t^*) = \int_{t \in \{t^0:t^*\}} \left[ \sum_{(k,j) \in \{I^L\} \cup \{I^{out}\}} Q_{k,j}(t) - Q_j(t) \right] dt / \int_{t \in \{t^0:t^*\}} \sum_{(k,j) \in \{I^L\} \cup \{I^{out}\}} Q_j(t) dt, \quad \forall j \in [\{J^L\} \cup \{J^{out}\}], \quad (14)$$

Наша цель состоит в том, чтобы в конце периода управления достигнуть минимума дисбаланса в рассматриваемом контуре. Поскольку все водопотребители являются независимыми, то величину дисбаланса можно рассматривать как куб в пространстве с размерностью  $|\{J^L\} \cup \{J^{out}\}|$  и длиной ребра равной  $\alpha_j(t^*)$ . Минимальный объем этого куба, как известно, которое достигается при условии:

$$\alpha_j(t^K) = \alpha_k(t^K), \quad \forall j \neq k; j, k \in [\{J^L\} \cup \{J^{out}\}], \quad (15)$$

Следовательно, задача оптимальной корректировки траектории ирригационной системы по реально складывающейся ситуации приводит к следующему функционалу:

$$\begin{aligned} & \mathcal{N}(W_j(\bullet), U_{j,k}(\bullet), t^*) = \\ & = \sum_{j \in \{J^L\} \cup \{J^{out}\}} \int_{t^*}^{t^K} \lambda_j^2 \times [Q_j(t) \times (1 - \alpha_j(t^*)) - \sum_{(k,j) \in \{I^L\}} Q_{k,j}(t) \times [\sum_{(k,j) \in \{I^L\}} Q_{k,j}(t) - Q_j(t) \times (1 - \alpha_j(t^*))]] dt \rightarrow \\ & \rightarrow \sup, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\psi(t^*, W_j(t^*), t^K, W_j(t^K)) = 0 \quad (17)$$

$$U_{j,k}(t) \in U_{j,k} \quad \forall [(j,k) \in \{I^U\}], t \in \{t^*:t^K\} \quad (18)$$



Все обозначения (16)-(18) имеют тоже смысл, что и в (11)-(13).

### 4.3. Дискретная задача оптимального управления

Для завершения постановки задач оперативного планирования и управления необходимо перевести их к дискретному виду, но прежде чем трансформировать функционалы (11) и (16), выполним следующее преобразование для  $Q_{j,k}$ , формула (7). Выражение для  $Q_{j,k}$  можно записать в виде:

$$Q_{j,k}(a_{j,k}, W_j, U_{j,k}) = Q_{j,k}(f(a_{j,k}, U_{j,k}), W_j), \quad (19)$$

в функцию  $f(a_{j,k}, U_{j,k})$  вместо  $U_{j,k}$  подставим  $U_{j,k}$  - допустимое пространство управлений, и умножим ее на  $\Delta t$ , функция  $W_{j,k} = \Delta t \times f(a_{j,k}, U_{j,k})$  образует новое допустимое пространство управлений, но уже по переменной  $W_{j,k}$ , таким образом вместо (13) имеем:

$$W_{j,k}^{t+1/2} = W_{j,k}(W_j^t, W_j^{t+1}) \in W_{j,k}, \quad \forall [(j,k) \in \{I^U\}, t \in \{t^*: t^K\}] \quad (20)$$

Кроме этого заметим, что  $\alpha_j(t^0) = 0$  и, следовательно, функционал (11) является частным случаем функционала (16), дискретное выражение для которого, получим в виде:

$$\begin{aligned} \mathcal{N}(W_j(\bullet), W_{j,k}(\bullet), t^*, t^K) = & \sum_{j \in \{J^L\} \cup \{J^{out}\}} \sum_{t \in \{T^*\}} [w_j^t \times (1 - \alpha_j^*) - \sum_{(k,j) \in \{I^L\}} W_{k,j}^{t+1/2}] \times \lambda_j^2 \\ & \times [ \sum_{(k,j) \in \{I^L\}} W_{k,j}^{t+1/2} - w_j^t \times (1 - \alpha_j^*) ] \rightarrow \sup, \quad \forall (j,k) \in \{I^U\} \end{aligned} \quad (21)$$

Здесь  $\{T^*\} = \{t^*: t^K\}$ ,  $\alpha_j^* = \alpha_j(t^*)$ , кроме этого вместо (1) выполняется (6), остальные выражения задачи (1)-(18) не меняются. Реализация выше сформулированных задач оптимального планирования и управления выполнена на алгоритмическом языке GAMS.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Духовный В.А.. Ирригационные комплексы на новых землях Средней Азии. - Ташкент, "Узбекистан", 1983 г., 184 с.
2. Лаукс Д., Стединжер Дж., Хейт Д. Планирование и анализ водохозяйственных систем. М.: Энергоатомиздат, 1984 г., 400 с.
3. Тучин А.И., Холдков А.В., Ильинко А.В.. Математическая модель расчета состояний водохозяйственной системы // В сб. "Исследование функционирования и математическое моделирование водохозяйственных объектов и систем в условиях катастроф и стихийных бедствий". - Ташкент, САНИИРИ, 1987. - С. 3-8.

Сорокин А.Г.

## ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ БАССЕЙНОВ РЕК

*Рассматриваются подходы, принципы и тенденции управления водными ресурсами трансграничных рек. Предлагается метод поиска рационального ирригационно-энергетического режима работы водохранилищного гидроузла, основанный на принципе Парето.*

### ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Под *управлением* будем понимать такую организацию процесса, которая обеспечивает достижение определённых целей. Из существующих этапов управления (определение цели, оценка ситуации, принятие решения, исполнение и контроль) основное внимание будет уделено оценке ситуации.

*Водные ресурсы* будем рассматривать как водные массы, формирующиеся в *водных объектах* (речной сети, водохранилищах), как составную часть единого гидрологического цикла в пределах всего бассейна. Реки, как водные объекты, пересекающие границы государств определены как *трансграничные*.

Под *управлением водными ресурсами* будем понимать воздействие человека:

(а) непосредственное на режим водных ресурсов и их распределение через водные объекты,

(б) косвенное на формирование требований и ограничений к использованию водных ресурсов через организацию водопользования (включающего водопотребление и водоотведение), социально-экономической и экологической деятельности общества, в целях рационального перераспределения и использования водных ресурсов, создания устойчивого *водохозяйственного комплекса*.

Управление будем рассматривать с позиций современных научных тенденций и достижений, в частности с позиций *системных исследований* [1]. Такой подход позволяет лицам, принимающим решения (ЛПР), использовать эффективные способы управления, основанные не на изучении отдельных водохранилищ, а на *комплексном и многоцелевом* изучении *водохозяйственных систем (ВХС)*, имеющих уровни *агрегирования*. При этом ВХС рассматриваются как *системы управления*, включающие *управляемую часть*, то есть *объект управления* – *водохозяйственный комплекс (ВХК)* и *управляющую*.

*Управляющая система* включает три основные компоненты: (1) организацию управления, (2) формирование и оценку управляющих воздействий, (3) принятие и реализацию решений.

### ПРИНЦИПЫ И ТЕНДЕНЦИИ

Мы рассматриваем ВХК (объект управления) как единую систему управления, которая имеет особые *свойства, не присущие отдельным элементам системы, а характерные только для “системного целого”* (такое качество, присущее природным и природно-техническим системам, называется *эмерджентностью*). Принцип эмердж-

ментности лишает смысла *отраслевой, однокомпонентный подход к управлению*, имеет *определяющее значение для экономического и экологического мышления*, когда есть понимание того, что только совместные действия всех участников ВХК способны не допустить экологическую катастрофу и повысить благосостояние всех народов региона. Чисто потребительский подход к водным ресурсам сменяется экологически допустимым, при котором требования природы с позиций устойчивости и будущих поколений становятся приоритетными. Наблюдается формирование новых подходов, возможностей, *выводящих всю систему на новый качественный уровень*.

*Организация управления* (компонент управляющей системы) предполагает ответ на следующие вопросы: кому, где, как и когда организовать управление, с использованием каких средств, с какой целью, в течение какого времени? И определяется следующими факторами: структурой органов управления (межгосударственной и национальной), наличием и содержанием соглашений и правовых документов, состоянием технических средств управления, наблюдений, сбора и анализа информации.

*Формирование и оценка управляющих воздействий* (следующий компонент управляющей системы) предполагает: анализ функционирования объекта управления, создание *математических моделей* объекта, постановку и реализацию численных экспериментов по генерации вариантов и альтернатив на основе оценки последствий управления. Данный компонент исходя из принципов иерархичности и комплексности, можно представить в виде нескольких этапов.

*На первом этапе* устанавливаются основные закономерности функционирования ВХК на всех уровнях управления, снимаются факторы неопределённости.

*На втором этапе* оцениваются располагаемые к использованию водные ресурсы, выявляются неиспользуемые резервы, на которые можно ориентироваться при управлении.

*На третьем этапе* решается задача рационального (оптимального) распределения водных ресурсов между водопотребителями в рамках бассейна и территории, в многолетнем и годовом разрядах, снятие межгосударственные и межотраслевые противоречия и установление равновесия между бассейновым и территориальным, межгосударственным и национальным, отраслевым уровням, осуществляется *на основе компромисса посредством итераций между уровнями*, проверки национальных, территориальных и отраслевых требований на региональных, межгосударственных, бассейновых ограничениях, прежде всего экологических.

*На четвёртом этапе* осуществляется оперативное управление, включающее анализ фактической ситуации в сравнении с решениями, принятыми на третьем этапе, возможную корректировку планов исходя из знаний, полученных на первом этапе.

Информация для *принятия решений* подготавливается по результатам численных расчетов, выполняемых с помощью *компьютерных моделей*.

Можно сказать, что в области управления водными ресурсами нам не известны *модели*, которые полностью удовлетворяли бы требованиям ЛПР. Разработчики используют комбинации трёх основных направлений планирования: *целевого, оптимизационного, компромиссного*.

При *целевом* планировании определяется набор планов, один из которых выбирается как наилучший по заранее определённому набору оценок, которые выдвигаются ЛПР. Используются *имитационные модели*, с помощью которых организуются численные эксперименты.

При *оптимизационном* подходе цели выражаются в виде критерия (целевой функции) и разработчик пытается получить *оптимальное* решение, подбирая для данной задачи приемлемую математическую процедуру.

При *компромиссном* планировании предполагается, что до начала процесса поиска решения цель не обязательно точно определена. Выполняется ряд *итерационных* вычислений. На каждой итерации получают новые представления о целях и часто происходит корректировка процесса поиска. Предварительно проводится анализ с целью исключения заведомо неэффективных решений (ищется множество оптимальных, по Парето, решений). Выделением такого множества кончается формальная процедура оценки вариантов и начинается полоса неформальных решений, доступная лишь человеку. Здесь часто используется тот же *принцип Парето*, который можно сформулировать так [2]: “*Следует считать, что любое изменение, которое никому не причиняет убытков а приносит некоторым людям пользу является улучшением*”.

Вопросы *трансграничного управления* наиболее обострены в аридных районах (бассейны рек Колорадо, Тигр, Евфрат, Иордан, Инд, Сырдарья, Амударья. Это объясняется прежде всего опасением нехватки воды в маловодные годы. Конфликты обусловлены также несовершенством водных законодательств, политическими мотивами. Здесь следует отметить *инициативы ООН, Всемирного Банка* и других международных организаций по содействию проведению переговоров и установлению *согласия в спорных вопросах управления* водными ресурсами между государствами. Через техническое, финансовое и юридическое содействие Всемирный Банк призван помогать правительствам в усилении Бассейновых организаций. Важное значение уделяется реализации *комплексного подхода* к управлению и получаемому *эффекту* от управления [3].

Успешное выполнение задач управления во многом зависит от *системы органов управления* и организации их работы. Важное значение имеет *эффективное разделение полномочий и функций управления* (межгосударственных, государственных, отраслевых), согласование принимаемых решений и контроль за их выполнением.

В мировой правовой практике нет единых правил рационального бассейнового управления. В межгосударственных соглашениях рассматриваются только конкретные случаи и отражаются конкретные решения, документы имеют, как правило, рекомендательный характер. Первостепенное значение имеет поиск сфер и форм взаимодействий, представляющих взаимный, прежде всего экономический интерес. *Решения основываются на общей заинтересованности государств в прибылях от использования стока! Применяется компромисс, который заключается в некоторых уступках одних пользователей другим, при обязательном покрытии (компенсации) возможных ущербов.* При этом, часто в отдельную категорию выделяют “*экологические*” водные ресурсы, которые *не подлежат использованию*. Соблюдаются основные правовые принципы: (1) *ни одно государство не должно осуществлять хозяйственную деятельность, приводящую к ущемлению интересов других государств;* (2) *любой ущерб должен подлежать возмещению.* Многое зависит от того, являются ли водные ресурсы, формирующиеся в трансграничных реках, в равной степени собственностью всех государств-потребителей или нет, имеют ли преимущество в использовании стока те государства, в пределах которых формируется основной объем водных ресурсов.

## РЕКОМЕНДАЦИИ

Приведем рекомендации по организации *компромиссного* планирования режима работы комплексного водохранилищного гидроузла с ГЭС, расположенного на трансграничной реке и регулирующего сток в интересах нескольких государств и отраслей (гидроэнергетика, ирригация).

В основе алгоритма, обеспечивающего поиск рационального ирригационно-энергетического регулирования, рекомендуется принимать принцип Парето, который можно сформулировать так [4]: считается, что любое изменение режима, которое ни-

кому не причиняет убытков, а приносит, хоть одному водопотребителю эффект, является улучшением.

Рассмотри двух условных водопотребителей, расположенных по течению реки в следующем порядке: гидроэнергетика (h), ирригация (i). Пусть в верхней части реки, где расположен первый водопотребитель, произошло изменение бытового режима реки, вызванное её зарегулированием, при этом, верхний водопотребитель согласился на корректировку своего энергетического режима; целесообразность корректировки пусть будет очевидна – эффект от неё у второго водопотребителя превышает ущерб у первого. Предлагаемый подход заключается в поэтапной корректировке энергетического режима в направлении получения ирригационного эффекта и компенсации ущерба верхнему водопотребителю.

Поиск рационального режима можно проследить на рис. 1. Ординатная плоскость задается по осям X и Y функциями F, которые характеризуют работу системы с точки зрения оценки первого (энергетического) и второго (ирригационного) водопотребителей. Расчет начинается с фиксации координаты A<sub>0</sub>, соответствующей "нулевому" варианту, который характеризуется наилучшим режимом для первого водопотребителя (вырабатывается максимум электроэнергии на ГЭС) и некоторыми эффектами E в энергетике и ирригации.

Для того, чтобы выровнять начальные условия поиска, определяется ущерб, наносимый первым водопотребителем второму в результате искажения бытового режима "нулевым" и второму водопотребителю компенсируются затраты; происходит смещение координаты A<sub>0</sub> в точку A<sub>1</sub>. Значения функций определяются по формулам:

$$F_1 = E_0 - \max \{ 0, ( E_b - E_0 ) \} \quad (1)$$

$$F_1 = E_0 + \max \{ 0, ( E_b - E_0 ) \} \quad (2)$$

Определяется точка A<sub>2</sub>, корректирующая предыдущую и так далее до A<sub>n</sub>. Улучшение ищется по формулам (3)-(5) и критерию (6).

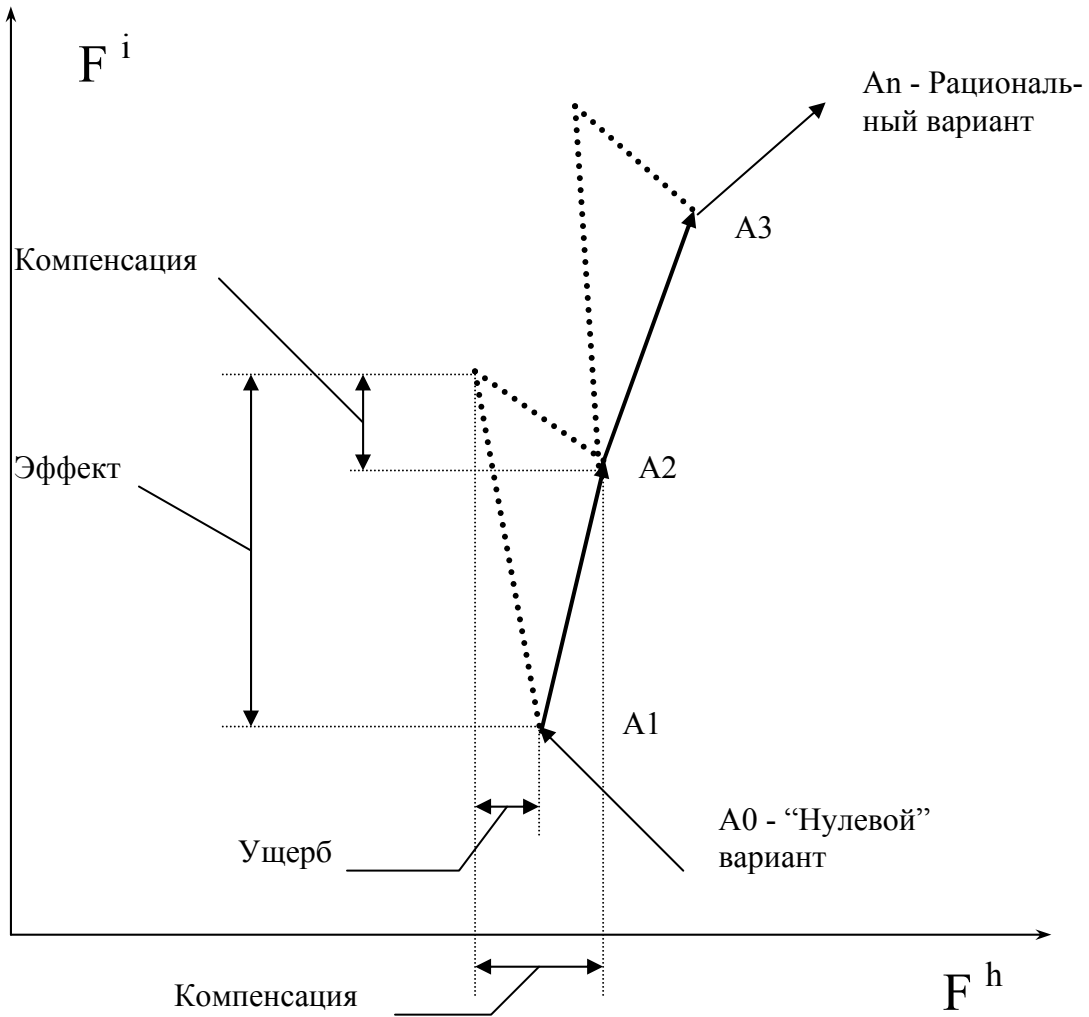
$$F_{(t+1)}^h = E_t^h - dY_{t-(t+1)}^h + dP_{t-(t+1)}^i \quad (3)$$

$$F_{(t+1)}^i = E_t^i + dE_{t-(t+1)}^i - dP_{t-(t+1)}^i \quad (4)$$

$$dP_{t-(t+1)}^i = dY_{t-(t+1)}^h + N * \max \{ 0, ( dE - dY )_{t-(t+1)} \} \quad (5)$$

$$\{ F_t^h + F_t^i \} \rightarrow \max \quad (6)$$

Где: dY, dE - приращение ущерба и эффекта; dP - часть прибыли, предназначенная для компенсации; N - норма отчисления прибыли; t - вариант режима; индексы "b" и "o" указывают на принадлежность характеристики к бытовому и нулевому режимам; i и h - ирригационный и гидроэнергетический потребитель.



**Рис. 1** Иллюстрация метода поиска рационального ирригационно-энергетического регулирования стока

Оценка режимов должна осуществляться с позиций национальных интересов государств региона по экономическим показателям. В качестве таких показателей рекомендуется использовать: эффекты от использования стока, ущерба, наносимые одному водопотребителю (водопользователю) со стороны другого, компенсации, выплачиваемые водопотребителю и покрывающие его ущербы. Эффект в ирригации определяется по чистой продукции орошаемого земледелия методом оценки валового дохода за минусом затрат, в гидроэнергетике - по чистой продукции, вырабатываемой на ГЭС электроэнергии с учетом доходов и затрат на её покупку и продажу.

Приведем результаты численных экспериментов по поиску рационального варианта регулирования стока Токтогульским водохранилищем с применением принципа Парето. В табл. 1 для сравнения дана оценка двух вариантов работы Токтогульского гидроузла (1) *Энергетического* (на графике он *Нулевой*, точка **A0**), (2) *Ирригационного* (на графике *рациональный вариант*, точка **An**).

Таблица 1

**Показатели работы Токтогульского водохранилища по энергетическому (A0) и ирригационному (An) вариантам**

Показатель	A0	An
Приток к Токтогульскому водохранилищу, км <sup>3</sup>		
- за вегетацию	9,3	9,3
- за межвегетацию	3,4	3,4
Попуск из Токтогульского водохранилища, км <sup>3</sup>		
- за вегетацию	3,5	6,5
- за межвегетацию	7,3	4,8
Дефицит оросительной воды, км <sup>3</sup>	3,0	0
Используемая выработка на ГЭС, млрд.кВт.ч		
- за вегетацию	3,1	3,1
- за межвегетацию	6,6	4,4
Дефицит выработки на ГЭС, млрд.кВт.ч		
- за вегетацию	0	0
- за межвегетацию	0	2,2
Эффект в ирригации, млрд.\$	1,33	1,54
Эффект в гидроэнергетике, млрд. \$	0,24	0,18
Компенсация энергетическому потребителю со стороны ирригационного пользователя как покрытие энергетического ущерба dY, млрд. \$	0	0,06
Компенсация энергетическому потребителю со стороны ирригационного пользователя как отчисление от прибыли dP, млрд. \$	0	0,02
Выгода ирригационного потребителя Fi, млрд. \$	<b>1,33</b>	<b>1,46</b>
Выгода энергетического пользователя Fh, млрд. \$	<b>0,24</b>	<b>0,26</b>

При проведении расчетов продуктивность оросительной воды принята в размере 0.07 \$/м<sup>3</sup>, ценность 1 кВт ч электроэнергии 0,025 \$.

**ВЫВОДЫ**

Еще не разработано и не согласованно на межгосударственном уровне *бассейновое соглашение*, регулирующее все основные вопросы управления и водопользования в регионе Центральной Азии. Чтобы оно стало реальным необходимо решить ряд проблем.

Во-первых, необходима единая для региона стратегия рационального регулирования, использования и охраны водных ресурсов, включающая принципы, подходы и критерии, программы первоочередных мероприятий и перспективного планирования.

Во-вторых, необходим единый пакет нормативов, инструкций, методик и инструментов (моделей, компьютерных программ), позволяющий формировать на краткосрочный и долгосрочный периоды управляющие воздействия, выбирать и обосновывать оптимальные варианты решений по управлению водными ресурсами, их использованию и охране. При этом важно уметь оценивать экономические, социальные и экологические интересы каждого государства, выявлять возможные конфликтные ситуации, определять эффективные пути их решения, иметь способы финансового воздействия на

водопотребителей при нарушении установленных режимов и лимитов водопотребления, определять эффекты, затраты, ущербы и соответствующие штрафы и компенсации при экономических взаиморасчетах между государствами.

В-третьих, необходим свод юридических документов по совместной водохозяйственной деятельности стран в регионе и регулированию водных отношений, учитывающих особенности существующих водных законодательств Республик, определяющих права и обязанности водопользователей, правовую ответственность за нарушения.

При обосновании решений по управлению (будь то основа для соглашения по перетокам водных и топливно-энергетических ресурсов между государствами или планируемые режимы работы каскадов водохранилищ на предстоящий сезон), то есть поиске рационального варианта управления мы рекомендуем применять принцип Парето. Принцип опробован при организации численных экспериментов на бассейновых моделях НИЦ МКВК.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Системный подход к управлению водными ресурсами / Под ред. А. Бисваса. Пер. с англ. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 392 с.
2. Лопатников Л.И. Популярный экономико-математический словарь. – 3-е изд., доп. М.: Знание, 1990 – 256 с.
3. Проект по природоохранной политике и технологии. Новые независимые государства. Политика Всемирного банка. Управление водными ресурсами. Рабочий отчет (подготовлен для Всемирного банка и Американского агентства по международному развитию) Алматы, 1995.
4. Сорокин А.Г. Ирригационно-энергетическое регулирование стока в бассейнах Сырдарьи и Амударьи. Сборник научных трудов САНИИРИ “Мелиорация и водное хозяйство”, 1996, С. 185-190.

*Тучин А.И.*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ОПОЛЗНЯМИ, В ОТКРЫТЫХ ВОДОЕМАХ**

**Введение.** Исследования неустановившихся процессов, возникающих вследствие обрушения оползня в Сарезское озеро, как численными методами, так и методами физического моделирования. Сложность проблемы состоит в том, что к настоящему времени невозможно достаточно достоверно оценить параметры оползня, который может обрушиться (объем основного оползня оценивается  $\sim 0,5-2 \text{ км}^3$ ), а, следовательно, невозможно оценить и параметры начальной волны. Кроме того, ни построенная физическая модель, ни имеющиеся математические модели не позволяют исследовать волны солитонного типа, вероятность возникновения которых достаточно велика.



Численное моделирование волновых процессов в Сарезском озере, возникающих в результате обрушения оползня, осуществлялось в Институте гидродинамики СО АН СССР, в НИС института "Гидропроект" и НПО "САНИИРИ". Математические модели, использованные для этих исследований, основывались на уравнениях мелкой воды, выписанных в квазиодномерном приближении, а возмущение, создаваемое падением оползня, моделировалось либо путем поднятия части свободной поверхности в месте предполагаемого вхождения оползня в воду, либо путем задания бокового притока с расходом, равным интенсивности входящего оползня. Второй метод более предпочтителен, поскольку не требует пересчета коэффициентов шероховатости, и более соответствует физике процесса. Однако, ни первый, ни второй метод не позволяют оценить искажение волны вследствие деформации основания, которая наиболее существенно сказывается на последующих волнах. В исследовании процессов, возникающих вследствие обрушения оползня в Сарезском озере, можно выделить четыре основные фазы, из которых складывается все гидродинамические составляющие:

- 1 фаза – обрушение оползня и генерация основной волны,
- 2 фаза – трансформация волны и ее перелив через Усойский завал,
- 3 фаза – деформация Усойского завала и формирование волны излива
- 4 фаза – движение волны излива по долине реки Мургаб.

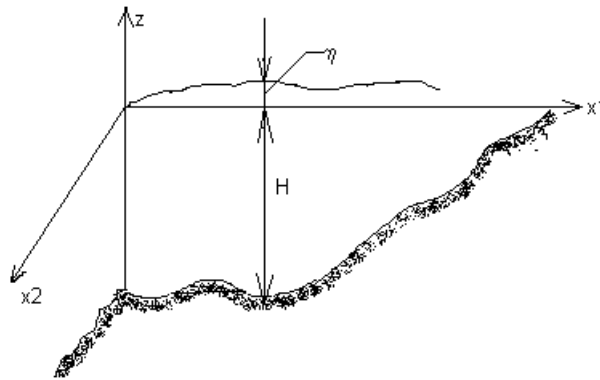
Первая фаза, самая короткая из вышеуказанных, характеризуется переходом потенциальной энергии оползня в кинетическую с последующей передачей этой энергии жидкости как через горизонтальные так и через вертикальные составляющие импульса. Вторая фаза соответствует движению волн внутри замкнутого водоема со сложной топографической поверхностью и формированием волны перелива через завал. В третьей фазе течение определяется параметрами волны перелива и условиями разрушения завала (если завал не деформируется  $\Rightarrow$  волна излива  $\equiv$  волне перелива). Четвертая фаза, зависит от гидрографа волны излива и топографии местности, по которой происходит движение волны. И в первой и во второй фазе корректное описание обмена импульса между элементами системы: оползень  $\Rightarrow$  вода  $\Rightarrow$  завал требует учета вертикальных ускорений и, следовательно, отказа от моделей в гидростатическом приближении, резкие изменения в очертании береговой линии приводят к необходимости плановой постановке задачи и с учетом подвижности основания.

Разработка математических моделей неустановившихся течений в открытых водоемах с негидростатическим распределением давления берет свое начало в работах Буссинеска [1]. В дальнейшем построение подобных моделей осуществлялось рядом авторов [2], [3], [4], [5] как применительно к конкретным задачам [2], [3], так и с целью более глубокого обоснования теории мелкой воды [5]. К нашей задаче наиболее подходит математическая модель, полученная А.А. Дорфманом [3], однако исходная предпосылка автора (она выражена неявно в краевом условии на дне) о незначительности градиентов исходного основания не позволяет напрямую использовать его уравнения. Поэтому в процессе исследований были выведены уравнения движения жидкости в открытом водоеме с учетом подвижности основания и построена модель, имитирующая вхождение оползня с учетом реакции отпора воды. В первом разделе приводятся уравнения движения воды, во втором – уравнения движения оползня, а в третьем разделе приводится алгоритм типа Бориса-Бука в интерпретации автора применительно к данной задаче.

## 1. УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Рассмотрим некоторый объем жидкости, ограниченный сверху свободной поверхностью, а снизу - твердым основанием. Введем систему декартовых координат, на-

чало которой расположим в плоскости невозмущенной поверхности жидкости. Оси  $\vec{X} = (x_1, x_2)$  совпадают с поверхностью жидкости, а ось  $z$  – направление вертикально вверх (рис. 1).



**Рис. 1**

Область, занятую жидкостью, обозначим  $R = R(\vec{x}, t)$  и сформулируем задачу: определить гидродинамические величины и области  $R, \vec{x} \in R, -H \leq z \leq \eta$  при  $t > 0$ , которые удовлетворяют уравнениям движения, начальным и краевым условиям гидродинамики несжимаемой жидкости, находящейся в поле тяжести.

Уравнения движения запишем в следующем виде:

$$\frac{d\vec{U}}{dt} + \omega \frac{\partial \vec{U}}{\partial z} + \nabla P = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} + \frac{\partial P}{\partial z} + g = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial z} + \nabla \vec{U} = 0 \quad (3)$$

Здесь:

$\vec{U}$  - вектор скорости в плоскости  $\vec{X}$ ;

$P$  - давление;

$\omega$  - вертикальная составляющая плоскости;

$g$  - ускорение свободного падения;

$\nabla \equiv \frac{\partial}{\partial \vec{x}}$  - векторно-дифференциальный оператор;

$\frac{d}{dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{U}\nabla)$  - субстанциональная производная.

Краевые условия сформулируем следующим образом:

На поверхности  $z = \eta$ :

$$\frac{d\eta}{dt} - \omega = 0 \quad (4)$$

$$P = 0 \tag{5}$$

На дне  $z=0$ :

$$\frac{dH}{dt} + \omega = 0 \tag{6}$$

Следует подчеркнуть, что краевое условие (6) предполагает безотрывность течения жидкости (это допущение хоть и в неявной форме присутствует практически во всех выводах [2, 3, 4, 5]). Функция  $H(\vec{x}, t)$  в нашем случае формирует все возмущения, связанные как с подвижностью основания, так и с изменением его (основания)  $H(\vec{x}, t)$  геометрии. Основное допущение, используемое в теории мелкой воды (именно поэтому она и называется «мелкой»), которым воспользуемся и мы, состоит в предположении:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \sim 0 \tag{7}$$

В этом случае уравнение (1) легко интегрируется и с учетом (5) дает:

$$h \frac{d\bar{U}}{dt} + \nabla \int_{-H}^{\eta} P(Z) dZ - P \nabla H \Big|_{z=-H} = 0 \tag{8}$$

где:  $h = \eta + H$  - толщина слоя жидкости.

Выражение для  $P(z)$  получим, используя уравнения (2), (3) и краевые условия. Из уравнения (3) совместно с (4) и (6) получим:

$$\omega = -(z + H) \nabla \bar{U} - \frac{dH}{dt} \tag{9}$$

Выражение (9) перепишем в виде:

$$\omega = -z \nabla \bar{U} - \varphi, \tag{10}$$

где:  $\varphi = \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla(\bar{U}H)$  - функция, не зависящая от  $z$ .

Из (2) имеем:

$$P(z) = - \int \left( g + \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) dz + C(\vec{x}, t) \tag{11}$$

Используя (10), сумму производных в подынтегральном выражении (11) можно записать в виде:

$$\frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} = z [(\nabla \bar{U})^2 - \frac{d}{dt} (\nabla \bar{U})] + \varphi \nabla \bar{U} - \frac{d\varphi}{dt} \tag{12}$$

Подставив (12) в (11) и интегрируя с учетом  $P = 0$   <sub>$z=\eta$</sub>  получим:

$$P(z) = (\eta - z)(g + \varphi \nabla \bar{U} - \frac{d\varphi}{dt}) + \frac{1}{2}(\eta^2 - z^2)[(\nabla \bar{U})^2 - \frac{d}{dt}(\nabla \bar{U})] \quad (13)$$

Подставив в (13) вместо  $z$ ,  $-H$  найдем выражение для третьего члена уравнения (8)

$$P_{|z=-H} = h[\alpha + \frac{1}{2}(h - 2H)\beta] = (\eta + H)[\alpha + \frac{1}{2}(\eta - H)\beta] \quad (14)$$

Обозначение  $\alpha$  и  $\beta$  следуют из выражения (13).

Для того, чтобы полностью определить (8), необходимо взять интеграл во втором члене:

$$\int_{-H}^{\eta} P(z) dz = \alpha z(\eta - \frac{z}{2}) + \frac{1}{2} \beta z(\eta^2 - \frac{1}{3} z^2) \Big|_{-H}^{\eta} = \quad (15)$$

$$\frac{1}{2} \alpha \eta^2 + \frac{1}{3} \beta \eta^3 + H[\alpha(\eta + \frac{H}{2}) + \frac{1}{2} \beta(\eta - \frac{1}{3} H^2)]$$

подставив (14) и (15) в (8), получим:

$$(\eta + H) \frac{dU}{dt} + \nabla \{ \eta^2 (\frac{1}{2} d + \frac{1}{3} \beta \eta) + H[\alpha(\eta + \frac{H}{2}) + \frac{1}{2} \beta(\eta^2 - \frac{1}{3} H^2)] \} - \quad (16)$$

$$(\eta + H)[\alpha + \frac{1}{2}(\eta - H)\beta] \nabla H = 0$$

Интегрирование (3) дает уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\eta + H) + \nabla[\bar{U}(\eta + H)] = 0 \quad (17)$$

Как частный случай из (16) можно получить уравнения движения, приведенные в [3], для этого достаточно принять  $\nabla H = 0$  и совместить начало координат с плоскостью основания, т. е.  $H = 0$ . В этом случае  $\eta = h$  и мы будем иметь уравнение [3, (15)]. Уравнения (17) и [3, (18)] различаются правой частью из-за неточности, допущенной Дорфманом [3] при постановке задачи.

## 2. УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ОСНОВАНИЯ (ИМИТАЦИЯ ОПОЛЗНЯ)

Возникновение и динамика катастрофических оползней формируется большим количеством факторов, главными из которых являются форма поверхности скольжения оползня и эффективный коэффициент трения. Определение формы поверхности скольжения больше относится к задачам статики, однако известны случаи, когда поверхность скольжения формировалась непосредственно процессом разрушения (т. е. динамикой самого оползня). Само движение оползня определяется законами гравитации и трения по поверхности скольжения, а также законами внутренней деформации. В отли-

чие от медленных и равномерно ползущих оползней механизм формирования катастрофических оползней во времени изучен мало. Обычно допускается, что сопротивление сдвигу по поверхности скольжения подчиняется закону Кулона-Моора, а гравитационный эффект описывается приростом энергии за счет вертикального смещения центра тяжести оползня. Таким способом можно оценить различные действующие силы и параметры движения для оползней с так называемым «жестким» вращением. Более сложными являются оползни, у которых для сохранения контакта с поверхностью скольжения, вводятся большие внутренние деформации и, следовательно, дополнительные затраты энергии. Поскольку механизм внутренних деформаций достаточно сложен и требует информации о структуре сползающего массива, обычно пользуются эффективным коэффициентом трения, который отражает всю диссипацию энергии при движении оползня, возникающую как за счет трения по поверхности скольжения, так и за счет внутренних деформаций. Феноменология катастрофических оползней показывает [6], что они носят характер турбидных морских потоков. Поэтому, несмотря на недостаточную изученность тех и других, можно допустить имитацию катастрофического оползня движением тяжелой жидкости ( $\rho \approx 2$ ), перемещающейся по твердому основанию, которое соответствует поверхности скольжения оползня. Рассмотрим эту модель более подробно. Пусть, как и ранее, некоторый объем жидкости занимает область  $R$  ( $\bar{X} \in R$ ). С одной стороны объем жидкости ограничен свободной поверхностью, с другой – основанием, причем часть основания является поверхностью тяжелой жидкости. Под обычной жидкостью будем подразумевать воду ( $\rho = 1$ ) и в дальнейшем пользоваться этим термином, а для тяжелой сохраним это же название. Введем декартову систему координат, начало которой расположим в плоскости невозмущенной поверхности воды (рис. 2).

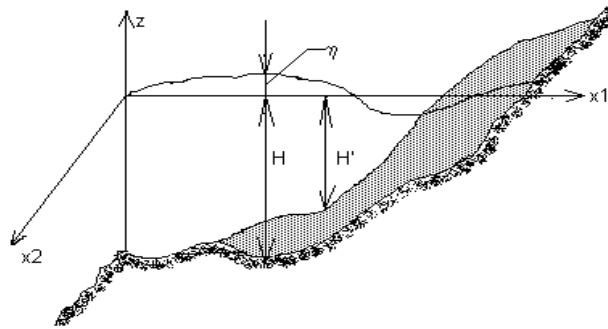


Рис. 2

Жидкости считаем несмешивающимися, тогда модель (пункт 1) остается без изменения, а функция  $\frac{dH}{dt}$  будет определяться движением тяжелой жидкости. Область, занятую тяжелой жидкостью, в плоскости  $\bar{X}$  обозначим через  $R'$ , всю область занятую обеими жидкостями, обозначим через  $R$ . Ясно, что могут существовать моменты времени, когда  $R' \cap R = \emptyset$  и  $(R' \cup R) \subset R^0$ , поэтому функции  $H$  и  $H'$  заданы в  $R$ , причем для области  $R^0 \setminus (R' \cup R)$ ,  $H = H'$ .

Исходя из этого изменение области ординаты тяжелой жидкости подчиняется уравнениям и краевым условиям гидродинамики несжимаемой жидкости, находящейся

в поле тяжести, с некоторой диссипативной функцией, зависящей только от  $\vec{V}$  ( $\vec{V}$  - вектор скорости тяжелой жидкости в плоскости  $\vec{X}$ ):

$$\frac{d\vec{V}}{dt} + V \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \nabla P' + f(\vec{X}, \vec{V}, z) = 0; \quad (18)$$

$$\frac{dV}{dt} + V \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial z} + g = 0; \quad (19)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} + \nabla \vec{V} = 0; \quad (20)$$

где  $v$  - вертикальная составляющая скорости и тяжелой жидкости;  $\rho$  - плотность тяжелой жидкости, остальные обозначения соответствуют уравнениям (1)-(3). Краевые условия сформулируем следующим образом: на поверхности тяжелой жидкости ( $z = -H$ ):

$$\frac{dH}{dt} + V = 0 \quad (21)$$

$$P' = \begin{cases} P(\vec{x}, t) / \vec{x} \in R \\ 0 / \vec{x} \in R \end{cases}, \quad (22)$$

где  $P(\vec{x}, t)$  - функция, определенная по формуле (14) на дне  $z = -H'$ .

$$\vec{V} \nabla H' + V = 0; \quad (23)$$

$H'(\vec{x})$  - заданная функция, соответствующая сначала поверхности скольжения оползня, а затем твердому основанию водоема. Как и в предыдущем разделе, примем:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial z} = 0, \quad (24)$$

Интегрирование уравнения (18) дает:

$$h' \frac{dV}{dt} - \frac{1}{\rho} \left\{ \nabla \int P' dz + P' \nabla H \Big|_{z=-H} - P' \nabla H \Big|_{z=-H} \right\} + \int f(\vec{x}, \vec{y}, z) dz = 0, \quad (25)$$

где:  $h' = -H + H'$  - толщина слоя тяжелой жидкости.

Интеграл  $\int_{-H}^H f(\vec{x}, \vec{y}, z) dz$  - временно обозначим как  $C = C(\vec{x}, \vec{V}, h')$  и оставим неопределенным, с тем, чтобы в дальнейшем иметь возможность рассмотреть несколько гипотез формирования оползня. Уравнение (20) совместно с (21) и (22) дает выражение для  $V$  и интегральное по  $z$  уравнение неразрывности:

$$V = -z\nabla\vec{V} - \nabla(\vec{V}H') \quad (26)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(h') + \nabla(\vec{V}h') = 0 \quad (27)$$

Выражение для  $P'(z)$  находим из (19), предполагая гидростатическое распределение давления, что с учетом (22) дает:

$$P'(z) = -(H + z)\rho \times g + P \quad (28)$$

Подставив (28) в (25), после интегрирования и элементарных преобразований получим:

$$h' \frac{d\vec{V}}{dt} + g \frac{1}{2} \nabla(h')^2 + h' \left( \frac{1}{\rho} \nabla P - g \nabla H' \right) + C(\vec{x}, \vec{y}, h') = 0 \quad (29)$$

Если функцию  $C(\vec{x}, \vec{V}, h')$  определить, пользуясь гидравлической аналогией [6, 7], то она может быть представлена в виде [7]:

$$C(\vec{x}, \vec{V}, h') = C(\vec{x}) \frac{|\vec{V}|^3}{h'} \quad (30)$$

где:  $C(\vec{x})$  - некоторая известная постоянная, зависящая от шероховатости поверхности.

Принимая более сложные зависимости для  $C(\vec{x}, \vec{V}, h')$  можно построить целое семейство моделей формирования оползня (вплоть до затвердевающего), но это требует проведения специальных исследований с использованием экспериментального материала. Из уравнения (29) видно, что его решение зависит от значения  $P$ , которое определяется формулой (14), т.е. полная математическая модель вхождения оползня и формирования волны включает уравнения (14), (16), (18), (27), (29), (30) относительно переменных  $\vec{U}$ ,  $\vec{V}$ ,  $P$  и  $C$ .

### 3. АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Численная реализация математической модели, изложенной выше, осуществляется на основе конечно-разностных методов с использованием явных схем сквозного счета. Выбор явных схем обусловлен тем, что динамичность процессов достаточно высока и среди параметров, управляющих их физическими характеристиками, отсутствуют такие, которые при малых собственных значениях вносят возмущения постоянного знака. Для построения вычислительного алгоритма необходимо выполнить дискретизацию как самого объекта, так и уравнений движения.

Пусть  $R^0$  - двумерная область, в которой может протекать рассматриваемый процесс,  $\partial R^0$  - ее граница, на которой ставятся граничные условия. Через  $R$  и  $\partial R$  обозначим двумерную область, занятую жидкостью. Введем прямоугольную равномерную сетку:

$$R_{ij} = \{x_{ij} = (i \cdot \Delta; j \cdot \Delta), i = 1, 2, \dots, N; j = n_i, n_{i+1}, \dots, k_i\} \quad (31)$$

$$\partial R_{ij} = \left\{ \chi_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}}; \chi_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}}; i = 1, N, j = n_i, k_i \right\} \quad (32)$$

Конструкция разностной сетки (31)б (32) незначительно усложняет вычислительный алгоритм, зато позволяет при сложной плановой конфигурации исследуемого объекта, в несколько раз снизить объем вычислений. Помимо целых узлов сетки будем также пользоваться и дробными узлами  $x_{ij} \pm \frac{1}{2} = (i \cdot \Delta; (j \pm \frac{1}{2})\Delta)$ . В целых узлах сетки вычислим параметры массы и давления, а в дробных скорости и расхода. Кроме этого будем пользоваться следующими обозначениями [8], понятие индекса  $y$  функции вверх означает, что она берется с верхнего временного слоя, т.е.  $Y_{ij} = Y(t + \sigma t)$ , а  $Y_{ij} = Y(t)$ ,  $\sigma t$  - шаг интегрирования по времени. Поскольку в статье рассматриваются только двухслойные разностные схемы, то этих обозначений достаточно. Уравнения движения приведем к дивергентной форме и записав их в виде, рекомендованном в [9], получим

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(h\vec{U}) = 0 \quad (33)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(U, h) + \nabla(hU, \vec{U}) + \frac{\partial P}{\partial x_1} = P_H \frac{\partial H}{\partial x_1} \quad (34)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(U_2 h) + \nabla(hU_2 \vec{U}) + \frac{\partial P}{\partial x_2} = P_H \frac{\partial H}{\partial x_2} \quad (35)$$

где  $U_1, U_2$  - компоненты вектора скорости  $\vec{U}$  по осям  $x_1$  и  $x_2$  соответственно:

$P_H = h[\alpha + \frac{1}{2}(h - 2H)\beta]$  - давление на дно;

$P = \frac{1}{2}\alpha\eta^2 + \frac{1}{3}\beta\eta^3 + H[\alpha(\eta + \frac{H}{2}) + \frac{1}{2}\beta(\eta^2 - \frac{1}{3}H^2)]$  - сила давления.

Обозначения для  $\alpha$  и  $\beta$  указаны в формуле (13).

В уравнения (33)-(35) входит величина  $h$  ( $h = \eta + H$ ), поэтому выражение для  $P$  удобно представить также в виде функции от  $h$  и  $H$ , что дает

$$P = h^2 \left[ \frac{1}{2}\alpha + \frac{1}{3}\beta \left( h - \frac{3}{2}H \right) \right] \quad (36)$$

В выражения для  $\alpha$  и  $\beta$  входят субстанциональные производные, которые при использовании неподвижной сетки необходимо преобразовать в частные. Для этого в выражениях  $\alpha$  и  $\beta$  раскроем оператор  $\frac{d}{dt}$ , получим:

$$\alpha = g - \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \varphi \nabla \vec{U} - \vec{U} \nabla \varphi \quad (37)$$



$$\beta = (\nabla U)^2 - \frac{\partial}{\partial t}(\nabla U) - U \nabla \cdot (\nabla U) \quad (38)$$

Выражение для  $\alpha$  можно было бы раскрыть и дальше с учетом того, что  $\varphi = \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla(UH)$ , однако при построении численного алгоритма удобно сохранить переменную  $\varphi$ .

Аппроксимация уравнений (33) – (35) осуществляется на основе методов расщепления [9, 10, 11] с использованием идей, изложенных в [12, 13, 14]. Расщепление осуществляется между конвективной частью и давлением. Рассматривая движение элементов жидкости в Лагранжевом представлении, на первом полушаге имеем

$$\frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (39)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} q_1 + \frac{\partial P}{\partial x_1} = P_H \frac{\partial H}{\partial x_1} \quad (40)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} q_2 + \frac{\partial P}{\partial x_2} = P_H \frac{\partial H}{\partial x_2} \quad (41)$$

на втором – соответственно

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(hU) = 0 \quad (42)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} q_1 + \nabla(q_1 U) = 0 \quad (43)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} q_2 + \nabla(q_2 U) = 0 \quad (44)$$

где:  $q_1 = U_1 h$ ;  $q_2 = U_2 h$ .

Эта схема, именуемая обычно как метод «частиц в ячейках», [9, 14] сопровождается осцилляциями, для устранения которых в [12, 13] был предложен метод искусственной диффузии с последующей коррекцией потоков. Суть метода состоит в том, что на втором полушаге в правую часть уравнений (42) – (44) вводится диффузионная добавка, размазывающая импульс и массу по разностной сетке. После этого применяется специальный алгоритм коррекции, восстанавливающий решение. применительно к нашей задаче наиболее подходит “LPE” – вариант [13], поскольку важно сохранить дисперсионные свойства уравнений движения. Уравнения (40), (41) выпишем для дробной точки (выписывать уравнение (39) не нужно, поскольку  $h$  не меняется).

$$q_1^{-i+\frac{1}{2},j} = q_{1i+\frac{1}{2},j} - \frac{\tau}{\Delta} \left[ P_{i+1,j} - P_{i,j} - P_{Hi+\frac{1}{2},j} (H_{i+1,j} = H_{i,j}) \right] \quad (45)$$

$$q_2^{-i+\frac{1}{2},j} = q_{2i+\frac{1}{2},j} - \frac{\tau}{\Delta} \left[ P_{i+1,j} - P_{i,j} - P_{Hi+\frac{1}{2},j} (H_{i+1,j} = H_{i,j}) \right] \quad (46)$$

Уравнения (42) – (44) аппроксимируются в целой точке:

$$h^{ij} = h_{ij} - \frac{\tau}{\Delta} \left[ f_i^{hi+\frac{1}{2}} - f_i^{hi-\frac{1}{2}} + f_j^{hi+\frac{1}{2}} - f_j^{hi-\frac{1}{2}} \right] \quad (47)$$

$$q_l^{ij} = q_{lij} - \frac{\tau}{\Delta} \left[ f_{li}^{qi+\frac{1}{2}} - f_{li}^{qi-\frac{1}{2}} + f_{lj}^{qi+\frac{1}{2}} - f_{lj}^{qi-\frac{1}{2}} \right] \quad (48)$$

Здесь  $l = 1, 2$  - указывает направление движения,

$f^h$  и  $f_l^q$  - потоки массы и импульса, соответственно.

Основное различие разностных схем заключается именно в том, как определены потоки  $f^h$  и  $f^q$ . В нашем случае мы пойдем по пути усложнения в определении  $f^h$  и  $f^q$ , отталкиваясь от рекомендаций [9] и [12]. Во-первых, величину скорости в дробной токе определим из условий интерполяции деформируемого объема жидкости [12]. Это дает

$$U_i^{j+\frac{1}{2}} = \frac{U_{ij+1} \in_{ij}^- + U_{ij} \in_{ij+1}^+}{\in_{ij}^- + \in_{ij+1}^+}, \quad (49)$$

Соответственно

$$U_j^{i+\frac{1}{2}} = \frac{U_{i+1,j} \in_{ij}^- + U_{ij} \in_{i+1,j}^+}{\in_{ij}^- + \in_{i+1,j}^+} \quad (50)$$

где  $\in_{ij}^\pm = \frac{1}{2} \pm \frac{\tau}{\Delta} U_{ij}$ .

Потоки  $f^h$  и  $f_l^q$  определяются следующими формулами (вариант без диффузии и коррекции):

$$f_i^{hj+\frac{1}{2}} = h_{ij+\frac{1}{2}} \cdot U_i^{j+\frac{1}{2}}; \quad f_j^{hi+\frac{1}{2}} = h_{i+\frac{1}{2},j} \cdot U_j^{i+\frac{1}{2}} \quad (51)$$

$$f_{li}^{qi+\frac{1}{2}} = q_{li}^{j+\frac{1}{2}} \cdot U_i^{j+\frac{1}{2}}; \quad f_{lj}^{qi+\frac{1}{2}} = q_{lj}^{i+\frac{1}{2}} \cdot U_j^{i+\frac{1}{2}}; \quad l = 1, 2; \quad (52)$$

$$\text{где: } (h, q)_{i,j+\frac{1}{2}} = \begin{cases} (h, q)_{i,j} \text{ при } U_i^{j+\frac{1}{2}} > 0 \\ (h, q)_{ij+1} + 1 \text{ при } U_i^{j+\frac{1}{2}} < 0 \end{cases} \quad (53)$$

$$(h, q)_{i+\frac{1}{2}, j} = \begin{cases} (h, q)_{i, j} & \text{при } U_j^{i+\frac{1}{2}} > 0 \\ (h, q)_{i+1, j} & \text{при } U_j^{i+\frac{1}{2}} < 0 \end{cases} \quad (54)$$

Формулы (53), (54) показывают, что в разностной схем используется прием, обычно называемый «против ветра»; он позволяет без потери консервативности схемы сохранить транспортные свойства исходных уравнений. Кроме этого, как отмечено в [9], схемы с разностями «против ветра» обладают собственной (схемной) вязкостью, достаточной для устойчивого счета и частичного подавления осцилляций. Алгоритмы Бориса и Бука начинаются с введения формулы вычисления потоков  $f^h$  и  $f^q$  диффузии, н зависящей от скорости, с последующей коррекцией этих потоков. Диффузионные поток обозначим  $\Phi$ , а антидиффузионные (этап коррекции) -  $\tilde{\Phi}$ . Выражение для (1) имеет простой вид:

$$\Phi_i^{hj+\frac{1}{2}} = \mu_i^{j+\frac{1}{2}}(h_{ij+1} - h_{ij}); \quad \Phi_j^{hi+\frac{1}{2}} = \mu_j^{i+\frac{1}{2}}(h_{i+1, j} - h_{ij}) \quad (55)$$

$$\Phi_{li}^{qj+\frac{1}{2}} = \mu_i^{j+\frac{1}{2}}(q_{l, i, j+1} - h_{l, i, j}); \quad \Phi_{lj}^{qi+\frac{1}{2}} = \mu_j^{i+\frac{1}{2}}(q_{l, i+1, j} - h_{l, i, j}), \quad (56)$$

где  $\mu_i^{j+\frac{1}{2}} = \frac{1}{3} \left[ \frac{1}{2} + \left( \frac{\tau}{\Delta} U_i^{j+\frac{1}{2}} \right)^2 \right]$ ;  $\mu_j^{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{3} \left[ \frac{1}{2} + \left( \frac{\tau}{\Delta} U_j^{i+\frac{1}{2}} \right)^2 \right]$  - коэффициенты диффузии, соответствующие LPE – алгоритму [13].

Значения параметров потока в целой точке пере вычисляются через  $\Phi$ :

$$h^{0ij} = h^{ij} - \left[ \Phi^{hj+\frac{1}{2}} - \Phi^{hj-\frac{1}{2}} + \Phi^{hi+\frac{1}{2}} - \Phi^{hi-\frac{1}{2}} \right] \quad (57)$$

$$q^{0ij} = q^{ij} - \left[ \Phi^{qj+\frac{1}{2}} - \Phi^{qj-\frac{1}{2}} + \Phi^{qi+\frac{1}{2}} - \Phi^{qi-\frac{1}{2}} \right] \quad (58)$$

Процесс коррекции состоит из двух шагового вычисления антидиффузионных потоков и последующего восстановления решения. сначала вычисляются грубые антидиффузионные потоки по формулам:

$$\tilde{\Phi}^{0hij+\frac{1}{2}} = \chi_i^{j+\frac{1}{2}}(h^{0ij+1} - h^{0ij}); \quad \tilde{\Phi}^{0hi+\frac{1}{2}, j} = \chi_j^{i+\frac{1}{2}}(h^{0i+1, j} - h^{0ij}) \quad (59)$$

$$\tilde{\Phi}^{0qij+\frac{1}{2}} = \chi_i^{j+\frac{1}{2}}(q_l^{0ij+1} - q_l^{0ij}); \quad \tilde{\Phi}^{0qi+\frac{1}{2}, j} = \chi_j^{i+\frac{1}{2}}(q_l^{0i+1, j} - q_l^{0ij}), \quad (60)$$

где  $\chi_i^{j+\frac{1}{2}} = \frac{1}{6} \left[ 1 - \left( \frac{\tau}{\Delta} U_i^{j+\frac{1}{2}} \right)^2 \right]$ ;  $\chi_j^{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{6} \left[ 1 - \left( \frac{\tau}{\Delta} U_j^{i+\frac{1}{2}} \right)^2 \right]$  - коэффициенты антидиффузии.

Затем следует коррекция антидиффузионных потоков по формулам.

$$\tilde{\Phi}^{ij+\frac{1}{2}} = S \times \max \left\{ 0, \min \left[ \begin{array}{l} S \cdot (\xi^{ij+2} - \xi^{ij+1}) S \cdot (\xi^{i-1j+1} - \xi^{ij+1}) S \cdot (\xi^{i+1j+1} - \xi^{ij+1}) \left| \tilde{\Phi}^{0ij+\frac{1}{2}} \right| \\ S \cdot (\xi^{ij} - \xi^{ij-1}) S \cdot (\xi^{i1j1} - \xi^{i-1j}) S \cdot (\xi^{i+1j} - \xi^{i+1j}) \end{array} \right] \right\} \quad (61)$$

где  $S = \text{Sign}(\xi^{ij+1} - \xi^{ij})$

$$\tilde{\Phi}^{i+\frac{1}{2}j} = S \times \max \left\{ 0, \min \left[ \begin{array}{l} S \cdot (\xi^{i+2j} - \xi^{i+1j}) S \cdot (\xi^{i+1j-1} - \xi^{i+1j}) S \cdot (\xi^{i+1j+1} - \xi^{i+1j}) \left| \tilde{\Phi}^{0i+\frac{1}{2}j} \right| \\ S \cdot (\xi^{ij} - \xi^{i-1j}) S \cdot (\xi^j - \xi^{ij-1}) S \cdot (\xi^{i+1j} - \xi^{ij+1}) \end{array} \right] \right\} \quad (62)$$

где  $S = \text{Sign}(\xi^{i+1j} - \xi^{ij})$

Между  $\Phi$  и  $\xi$  существует следующее соответствие:

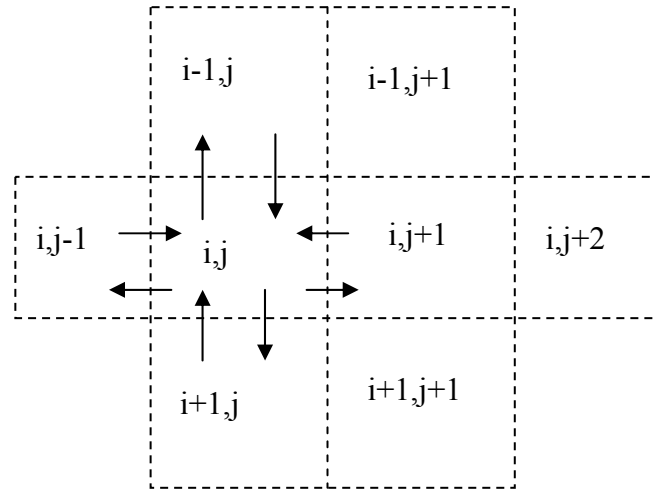
$$\tilde{\Phi} = \begin{cases} \Phi^h \Rightarrow \xi \equiv h \\ \Phi_1^q \Rightarrow \xi \equiv q_1 \\ \Phi_2^q \Rightarrow \xi \equiv q_2 \end{cases} \quad (63)$$

Вычисляются параметры течения на момент времени  $t + \tau$  по формулам:

$$\xi^{ij} = \xi^{0ij} + \left[ \tilde{\Phi}^{ij+\frac{1}{2}} - \tilde{\Phi}^{ij-\frac{1}{2}} + \tilde{\Phi}^{i+\frac{1}{2}j} - \tilde{\Phi}^{i-\frac{1}{2}j} \right], \quad (64)$$

где соответствие между  $\Phi$  и  $\xi$  принимается согласно (63).

На этом заканчивается расчет одного шага по времени. Расстановка узлов и направление потоков, принятое в алгоритме, показано на рис. 3.



**Рис. 3. Схема принятого направления диффузионных и анти диффузионных потоков**

Выполненные численные исследования показывают, что в месте падения оползня возникают две волны,двигающиеся в противоположных направлениях: первая, вызванная непосредственным падением оползня, идвигающаяся в направлении Усойского завала, достигает его на третьей минуте течения и вторая, возникающая в результате отражения обратной волны от ущелья в верховьях Сарезского озера.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Узием Д.Б. Вариационные методы и их приложение к волнам на воде. - В сб.: Нелинейная теория распространения волн. - М.: Мир, 1970. - С. 12-39.
2. Картвелишвили Н.А. Потоки в недеформируемых руслах. - Л.: Гидрометеиздат, 1973. - 279 с.
3. Дорфман А.А. О неустановившихся длинных кольцевых волнах конечной амплитуды, вызванных перемещениями дна бассейна. - В сб.: Теория волн и расчет гидротехнических сооружений. - М.: Наука, 1975.- С. 106 - 113.
4. Карпман В.И. Нелинейные волны в диспергирующих средах. - М: Наука, 1973. - 176 с.
5. Атавин А.А., Шугрин С.М. О дифференциальных уравнениях теории "мелкой воды". - В сб. Нестационарные задачи механики сплошных сред. вып. 70, - Новосибирск, 1985 г. - С. 25-53.
6. Шейдегер А.Е., Физические аспекты природных катастроф, М., Недра, 1981 г.
7. Ляхтер В.М., Милитеев А.Н. Гидравлические исследования численными методами. - Водные ресурсы, 1981, № 3.- С. 60-79.
8. Годунов С.К. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. - М.: Наука, 1976. - 400 с.
9. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. - М.: Наука. 1984. - 520 с.
10. Ковеня В.М., Яненко Н.Н. Метод расщепления в задачах газовой динамики. - Новосибирск: Наука, 1981. - 304 с.
11. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. - М.: Наука, 1977. - 456 с.

12. Jay P. Wrist and David L. Book, Flux - Corrected Transport. SHASTA, A Fluid Transport Algorithm That Works Journal of computational physics 11, 38-69 (1973).

13. Борис Дж.П., Бук Д.Л. Решение уравнений непрерывности методом коррекции потоков. - В сб.: Управляемый термоядерный синтез. - М.: Мир, 1980. - С. 92-141.

14. Рождественский Б.Л., Яненко Н.Н. Системы квазилинейных уравнений. - М.: Наука, 1978. - 688 с.

15. Абуталиев Ф.Б., Тучин А.И. Численный алгоритм расчета прорывных волн. В сб. Вопросы вычислительной и прикладной математики, вып. 64., Ташкент 1981 г.

16. Тучин А.И. О численном моделировании прорывных волн в подвижных сетках. В сб. САНИИРИ «Внедрение НИР в водное хозяйство». Ташкент, 1981 г.

Тучин А.И.

## ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛНЫ ПРОРЫВА

Одной из основных характеристик, формирующих начальные параметры волны прорыва, является динамика разрушения плотины, которую принято связывать с геометрией прорана. Для оценки фактического влияния деформации плотины на параметры волны прорыва необходимо исследовать изменение гидрографа расхода в створе плотины в зависимости от величины начального разрушения и скорости формирования прорана. Рассмотрим (рис. 1) случай образования в теле плотины (или рядом с плотиной) в момент времени  $t_0$  прорана с размерами  $\Omega_0$ , ( $\square t_0$ ) =  $\Omega_0$ ). Пусть  $w = w(z, t)$  - площадь поперечного сечения потока в проране, ( $w(z, t) \subset \square t_0$ ),  $\forall t \in \{t_0 : t_k\}$ , а  $z = z(t)$  - отметка горизонта воды в водохранилище,  $\{t_0 : t_k\}$  - рассматриваемый интервал времени.

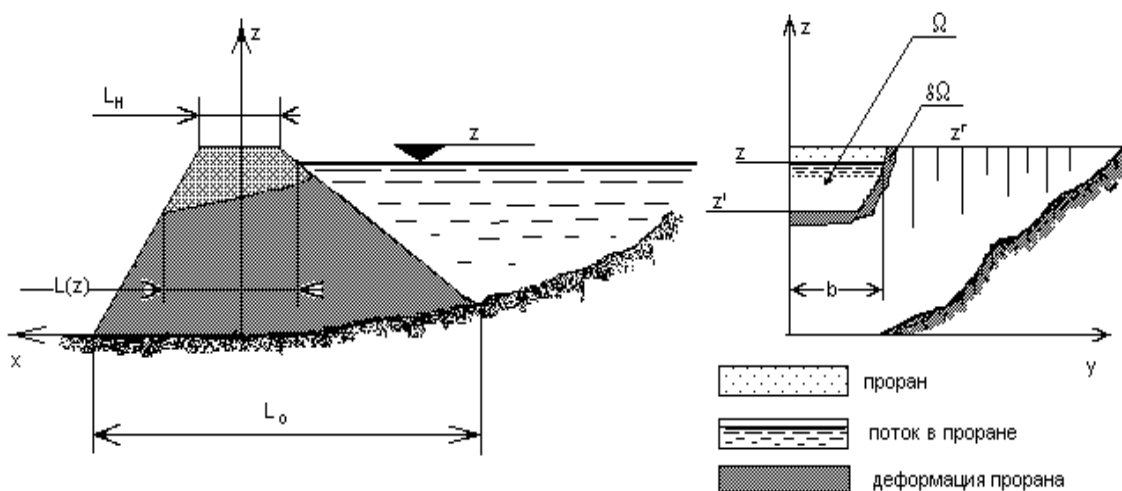


Рис. 1. Схема образования прорана в теле плотины

Течение через проран близко по параметрам к течению через водослив с широким порогом (влияние обратной волны в нашем анализе можно пренебречь), поэтому для величины мгновенного расхода через проран можно использовать слегка модифицированное уравнение гидравлики:

$$Q = Mw\sqrt{z - z'} \quad (1)$$

Здесь  $M = m\sqrt{2g'}$ ,  $m$  - коэффициент расхода ( $0,3 \leq m \leq 0,5$ ):

$z'$  - ордината центра тяжести поперечного сечения потока.

Площадь поперечного сечения потока в проране можно записать в виде:

$$w = b(z - z') \quad (2)$$

где:  $b$ - приведенная ширина площади поперечного сечения прорана.

Далее введем величину  $\beta$ , характеризующую форму прорана:

$$\beta = \frac{b}{z - z'} \quad (3)$$

Теперь площадь поперечного сечения потока в проране можно записать в виде:

$$w = \beta(z - z')^2 \quad (4)$$

Подставляя (4) в (1) и вынося  $z$ , получим выражение для горизонта воды в водохранилище:

$$z = z' + \left(\frac{Q}{M\beta}\right)^{2/5} \quad (5)$$

Для того, чтобы связать изменение центра тяжести сечения потока в проране с величиной расхода, необходимо принять какую-либо гипотезу относительно насыщения потока грунтовой массой на участке начало-конец плотины. Обычно принимается условие предельного насыщения потока в конце плотины. Следовательно, для определения величины удельного расхода твердой фазы  $q_s$  можно воспользоваться какой-либо эмпирической зависимостью. Обобщенно, любую из этих зависимостей можно записать в следующем виде:

$$q_s = \begin{cases} \eta \frac{u^3(u - u_H)}{w_0}, & \text{при } u \geq u_H \\ 0, & \text{при } u < u_H \end{cases} \quad (6)$$

где:  $u$  - скорость потока в проране ( $u=Q/w$ ),

$w_0$ - гидравлическая крупность твердой фазы,

$u_H$  - не размывающая скорость,

$\eta$  - параметр транспортирующей способности потока.

Отличия уравнения (6) от аналогичного, приведенного в [1], обусловлено тем, что насыщение потока в данной постановке задачи происходит только на участке начало-конец плотины, а концентрацией твердой фазы перед плотиной пренебрегается. Расход твердой фазы в нашем случае примет вид:

$$Q_s = \beta(z - z')^2 q_s \quad (7)$$

Из уравнения сохранения массы, записанного для участка начало-конец плотины, с учетом (7) и пренебрегая концентрацией наносов в начале плотины, после несложных преобразований получим:

$$(1 - m) \frac{d}{dt}(\Omega L) - Q_s = 0 \quad (8)$$

Здесь  $L = L(z')$  - средняя по сечению прорана толщина плотины;

$m$  - коэффициент пористости грунта,

$\Omega = \Omega(z^r - z')$  - площадь поперечного сечения прорана;

$z^r$  - ордината гребня плотины (рис. 1).

Площадь поперечного сечения прорана  $\Omega$  при условии  $\frac{\partial b}{\partial t} \geq -tg \varphi$  можно выразить через  $\beta$ ,  $z$  и  $z'$  следующим образом:

$$\Omega = \beta(z - z')(z^r - z') + tg \varphi (z^r - z)^2, \quad (9)$$

здесь:  $\varphi$  - угол гидродинамического равновесия откоса прорана.

Ветвь ( $\frac{\partial b}{\partial t} < -tg \varphi$ ), которая заведомо исключена из дальнейшего анализа, физически соответствует тому что, либо площадь поперечного сечения прорана в начальный момент времени достаточно велика и поток не участвует в формировании прорана (тривиальный случай), либо из-за неоднородности грунта поток формирует проран в глубь; в этом случае контур прорана известен и из (8) можно получить более простое уравнение:

$$(1 - m) \frac{d}{dt}(z' b L) + Q_s = 0 \quad (10)$$

Так как использование уравнения (10) вместо (8) сути дела не меняет (и в том, и в другом случае будут существовать стационарные, относительно  $Q$ , решения), то в дальнейшем будем пользоваться уравнением (8), как более общим. Изменение отметки горизонта воды в водохранилище  $z$  как функции расхода  $Q$  выражается через закон сохранения массы:

$$\frac{dW}{dt} + Q = 0 \quad (11)$$



С учетом того, что  $\frac{dW}{dz} = S(z)$ ,  $S(z)$  - площадь зеркала водохранилища, уравнение (11) примет вид:

$$\frac{dz}{dt} + \frac{Q}{S} = 0 \quad (12)$$

Совокупность уравнений (5)-(9) и (12) образует математическую модель формирования прорана потоком воды. Эта модель, за исключением варианта, когда вместо уравнения (8) используется (10), является незамкнутой, и для ее замыкания необходимо некоторым образом определить функции  $\beta$  и  $\varphi$  (функции  $L(z')$  и  $S(z)$  известны). Относительно  $\varphi$  известно, что эта величина является постоянной, зависящей от коэффициента сцепления и угла внутреннего трения грунта, слагающего тело плотины. С достаточной степенью точности численное значение  $\varphi$  можно принять равной углу внутреннего трения, вычисленному для мокрого откоса грунта. Относительно функции  $\beta$  высказано много различных гипотез и предложены эмпирические зависимости, например [1], однако обработка материалов натуральных наблюдений показывает, что эта величина колеблется вокруг единицы. Интересно, что значение  $\beta = 1$ , соответствует минимуму объема работ, обусловленных транспортировкой выносимого грунта потоком воды. Принятие этих положений позволяет получить замкнутую модель формирования прорана в теле плотины и получить численные значения  $z$ ,  $z'$ ,  $Q$ ,  $Q_s$ , как функции от  $t$ , в зависимости от начальной величины разрушения, параметров плотины и геометрии водохранилища. Качественный анализ выше приведенной модели показывает, что наряду с тривиальными решениями ( $u < u_H$ ), существует ветвь ( $\frac{dQ}{dt} = 0$ ), характеризующая критическое равновесие между скоростью формирования прорана и падением горизонта воды в водохранилище. При оценке параметров волны прорыва, наиболее важен вопрос прогнозирования максимального значения расхода и его возможные отклонения во времени. По физическому смыслу  $\frac{dz}{dt} < 0 \Rightarrow \frac{dS}{dt} < 0$ ;  $\frac{dL}{dt} > 0$ , момент времени, при котором наступает выполнение условия ( $\frac{dQ}{dt} = 0$ ), назовем критическим, поскольку именно в этот момент значение расхода максимально. Аналитические выражения для критических параметров можно найти лишь при очень грубых допущениях, прямоугольной плотины и цилиндрическом водохранилище, в этом случае выражения для критического расхода и прорана будут иметь вид [2]:

$$Q^{kp} = \frac{\beta}{M^4} \left[ \frac{(1-m)L\omega_0}{S\eta M^2} + u_H \right]^5 \quad (13)$$

$$(z - z')^{kp} = \frac{1}{M^2} \left[ \frac{(1-m)L\omega_0}{S\eta M^2} + u_H \right]^2 \quad (14)$$

Уравнения (13)-(14) выделяют две области с принципиально различными последствиями начального возмущения:

При  $z - z' < (z - z')^{kp}$  процесс разрушения плотины (преграды) будет носить затухающий характер и максимальные параметры волны будут наблюдаться в момент разрушения;

При  $z - z' > (z - z')^{kp}$  процесс разрушения становится нарастающим и приводит к полному разрушению плотины и опорожнению водохранилища.

Интересно отметить, что величины  $Q^{kp}$  или  $(z - z')^{kp}$  можно использовать при оценке устойчивости как для объектов искусственного происхождения (водохранилища), так и естественных (завалы, озера).

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ибад-Заде Ю.А. Транспортирование воды в открытых каналах. - М.: Стройиздат, 1983. - 272 с.
2. Тучин А.И. Формирование прорана. В сб.: "Исследование функционирования и математическое моделирование водохозяйственных объектов и систем в условиях катастроф и стихийных бедствий". - Ташкент, САНИИРИ, 1986. вып. 2, С. 30-37.

*Авакян И.С.*

## ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ПРОДУКЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО СЕКТОРА В ЗОНЕ ПРИАРАЛЬЯ

Одной из задач проекта «Оценка социально-экономических последствий усыхания Аральского моря», финансируемого по программе INTAS, является оценка экономического ущерба в зоне Приаралья. По классификации, приведенной в предварительном отчете по проекту [1], экономический ущерб является прямым ущербом и проявляется в отраслях экономики (промышленность, сельское хозяйство и т. д.).

Методологической основой определения прямого экономического ущерба в секторе сельское хозяйство послужило руководство [2], принятое для оценки воздействий на окружающую среду в мировой практике. Согласно этому руководству, наиболее рациональным для оценки подобных категорий ущербов является применение метода затрат на восстановление плюс экономическая стоимость пользы, которую могли бы оказать природные ресурсы до восстановления. Таким образом, на первом этапе было определено недополучение продукции, происходящее вследствие усыхания Аральского моря, т. е. утраченная польза.

Недополучение продукции в сельскохозяйственном секторе зоны Приаралья связано:

- с выбытием орошаемых земель;
- с сокращением урожайности сельскохозяйственных культур;
- с сокращением поголовья животных и уменьшением продуктивности животноводства.

Основной зоной проявления негативного влияния усыхания Аральского моря определены четыре района Каракалпакстана: Муйнакский, Бозатаузский, Кунградский, Тахтакупырский.

### НЕДОПОЛУЧЕНИЕ ПРОДУКЦИИ ОТ СОКРАЩЕНИЯ ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ

В рамках данного проекта ЭКО «Приаралье» проведен анализ сельскохозяйственного производства в указанных районах за период с 1960 по 1999 год.

Анализ данных по структуре использования орошаемых земель показывает, что в Кунградском и Тахтакупырском районах посевную площадь в основном занимает рис. Муйнакский и Бозатаузский районы занимаются животноводством и здесь площадь посевов в основном составляют кормовые культуры. Муйнакский район специализируется также на производстве рыбной продукции.

Анализ изменения площади орошаемых земель под хлопчатником показывает, что в Кунградском районе их величина за период 1960-1999 гг. уменьшилась почти в 3 раза. Это произошло в основном за счет увеличения площади посева риса (после организации инженерных рисоводческих хозяйств). Начиная с 1990 года, площади посева хлопчатника стабилизировались на уровне 3400-4800 га, с некоторым снижением его величины в 1995-1997 гг. Примерно такая же картина наблюдается и в Тахтакупырском районе, только здесь площадь хлопчатника ниже и колеблется от 1820 до 3200 га. В Бозатаузском районе площадь под посевами хлопчатника незначительна - 560-600 га.

В целом по Республике Каракалпакстан, начиная с 1991 года, площадь посевов хлопчатника стабилизировалась на уровне 145-149 тыс. га. По Кунградскому и Тахтакупырскому районам площади под хлопчатником к 2000 году возросли в 5-5,5 раз, по сравнению с 1960 годом.

С 1963-1965 гг. началось строительство специализированных рисоводческих хозяйств, и в отдельные годы площади вводимых новых орошаемых земель (в целом по Каракалпакстану) достигали 15-17 тыс. га в год. В зависимости от водности года площади посева риса в Кунградском районе колеблются от 17 до 19 тыс. га и за последние годы, начиная с 1996 года, наблюдается постепенное их снижение. За период 1996-1999 гг. площади, занятые под рис, сократилась почти на 3 тыс. га. Такое же сокращение площади посева риса наблюдается и по Тахтакупырскому району.

С 1991 года в соответствии с политикой обеспечения зерновой независимости каждый год увеличиваются посевные площади пшеницы. Увеличение площади посева пшеницы во всех районах осуществляется за счет сокращения площади посева кормовых культур, в основном люцерны. Это негативно отражается на севообороте, не способствует росту урожая сельскохозяйственных культур, снижает продуктивность животноводства.

В целом по Республике Каракалпакстан по состоянию на 1999 год площади посева пшеницы составляют 32660 га.

Начиная с 1991-1992 гг. в рассматриваемых районах наблюдается сокращение площадей посева овоще-бахчевых культур, кормовых культур, в том числе кукурузы на корм.

Начиная с 1994-1995 гг., как в пределах рассматриваемых районов, так и в целом по Республике Каракалпакстан, наблюдается повсеместное сокращение площади используемых орошаемых земель.

Динамика наличия и использования орошаемых площадей за период 1976-1997 гг. (табл. 1), показывает, что снижение используемых орошаемых площадей по Каракалпакстану за последние годы составило 80 тыс. га. Наибольшее их снижение произошло за тот же период по Муйнакскому району и составило 55 % от наличия

орошаемых земель данного района. По остальным районам зоны Приаралья используемые орошаемые площади сократились в среднем на 20-25 %. Если в целом по Каракалпакстану используемые орошаемые площади сокращены на 16 %, то по зоне Приаралья - на 25 %.

Таблица 1

## Динамика наличия и использования орошаемых земель, тыс. га

Показатели	1976	1980	1985	1990	1995	1997
<b>Каракалпакстан</b>						
Наличие	261,0	344,1	455,1	496,5	498,7	500,9
Использование	261,0	335,7	455,1	496,5	454,6	421,27
Не использовано	0	8,4	0	0	44,1	79,63
%	0	2	0	0	8,8	15,9
<b>Бозатаузский р-он</b>						
Наличие	Н/д	17,1	30,47	Н/д	29,81	30,0
Использование		17,1	30,47		25,76	25,5
Не использовано			0		4,05	4,5
%			0		13,586	15
<b>Кунградский р-он</b>						
Наличие	23,8	29,0	37,97	43	41,32	41,5
Использование	23,8	28,5	37,97	43	38,39	32,7
Не использовано	0	0,5	0	0	2,93	8,8
%	0	1,7	0	0	7	21,2
<b>Муйнакский р-он</b>						
Наличие	1,7	5,5	7,09	18,7	12,54	11,8
Использование	1,7	5,4	7,09	18,7	11,56	5,3
Не использовано	0	0,1	0	0	0,98	6,5
%	0	1,8	0	0	7,8	55
<b>Тахтакупырский р-он</b>						
Наличие	12,4	20	31,27	34,49	34,22	34,6
Использование	12,4	19,6	31,27	34,49	28,31	25,4
Не использовано	0	0,4	0	0	5,91	9,2
%	0	2	0	0	17	26,6

Выпадение орошаемых земель сопровождается недополучением продукции растениеводства, поскольку земель используется меньше, чем могло бы быть использовано. Недополучение продукции нами рассчитано исходя из средней продуктивности орошаемых земель, колеблющейся от 850 \$/га 1976 г. до 680 \$/га в 1997 г. с наивысшим показателем в 1980 г. - 1192 \$/га. Так как потери продукции возникают в разновременных этапах, для приведения потерь к единому времени использовалось компаундирование.

Коэффициент компаундинга принят равным 10 %. Потери сельского хозяйства от выпадения орошаемых земель за этот период составили в зоне Приаралья в 111,3 млн. \$. Потери в этой категории по всей территории Каракалпакстана составили за тот же период 536,1 млн. \$. Таким образом, потери от выпадения орошаемых земель в зоне Приаралья составляют примерно 20 % от общих потерь по Каракалпакстану (рис. 1).

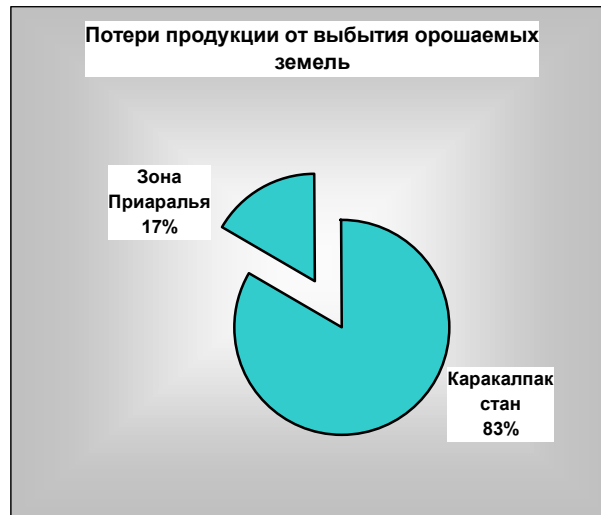


Рис. 1

### СНИЖЕНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Анализ информации относительно урожайности основных сельскохозяйственных культур показал, что как по Каракалпакстану в целом, так и по 4-м районам зоны Приаралья, начиная с 1960 года, наблюдается тенденция роста урожайности, с достижением максимума в 1980 году.

После 1980 года происходило неуклонное снижение урожайности по всем культурам. Минимальные значения приходятся на 1994 – 1995 года. После этого периода в последние годы наблюдается тенденция незначительного роста урожайности, однако, общее снижение за период 1980 – 1999 огромно.

Предварительный анализ достаточно большой по объему информации позволил обобщить данные по урожайности и сделать следующие выводы:

- Наиболее уязвимыми культурами с точки зрения снижения урожайности выявлены зерновые, рис, кукуруза кормовая, хлопок, овощи и бахчевые. Именно по этим культурам и приведено сравнение (табл.2).
- Анализ динамики урожайности сельскохозяйственных культур с 1960 г. показал, что тенденция снижения наблюдается с 1980 года по всей зоне Приаралья за исключением Тахтакупырского района. В этом районе наиболее высокая урожайность основных сельхозкультур соответствует более раннему периоду – 1975 г. Далее происходит снижение.
- За последние 20 лет в среднем по Каракалпакии наблюдается резкое снижение урожайности основных сельхозкультур в среднем от 1.5 раза для овощей до 3.8 раза для кормовой кукурузы.
- Сравнение падения урожайности по районам зоны Приаралья показывает, что в большей степени урожайность снизилась в Муйнакском районе, где по всем анализируемым культурам падение урожайности превышает в один и более раза средние цифры по Каракалпакстану, а урожайность кормовой кукурузы снизилась по сравнению со средней в Каракалпакстане практически в 2 раза.

- В 3<sup>x</sup> остальных районах зоны Приаралья снижение урожайности практически адекватно средним показателям Каракалпакстана.

Таблица 2

**Сравнение урожайности основных сельскохозяйственных культур по Каракалпакстану и зоне Приаралья**

Наименование зон	Культуры					
	зерновые	рис	Кукуруза кормовая	хлопчат- ник	овоци	бахчевые
<b>Каракалпакстан</b>						
1980	4,85	4,73	22,48	3,23	15,19	11,76
1999	2,0	2,0	5,91	1,35	10,25	7,18
снижение (раз)	2,43	2,37	3,80	2,39	1,48	1,64
<b>Муйнакский район</b>						
1980	3,8	3,0	26,49		7,9	8,64
1999	1,05	0,93	4,63		4,28	3,86
снижение (раз)	3,62	3,23	5,72		1,85	2,24
<b>Кунградский район</b>						
1980	5,62	5,59	22,29	2,62	15,69	9,91
1999	2,31	2,38	5,91	1,33	5,43	4,83
снижение (раз)	2,43	2,35	3,77	1,97	2,89	2,05
<b>Бозатаузский район</b>						
1980	4,47	2,4	23,97		10,2	9,66
1999	1,83	1,84	6,87		7,64	6,42
снижение (раз)	2,44	1,30	3,49		1,34	1,50
<b>Тахтакупырский район</b>						
1975	4,45	3,51	29,29	2,27	14,7	9,94
1999	1,69	1,7	5,21	1,52	8,8	8,67
снижение (раз)	2,63	2,06	5,62	1,49	1,67	1,15

Снижение урожайности сельскохозяйственных культур в Республике Каракалпакстан нельзя рассматривать только как результат усыхания Аральского моря. Безусловно, исчезновение моря (хотя за рассматриваемый период образовалось 100 тыс. га рисовых плантаций как водная поверхность) и ухудшение качества воды, а также значительное сокращение удельного водозабора на орошение играют определенную роль в снижении урожайности сельскохозяйственных культур. Однако, кроме этого, необходимо отметить, что снижение урожайности обуславливается так же нарушением агротехнических мероприятий, включая применение техники, внесение удобрений, использование агрохимикатов и прочих фактов, имевших место после 1986-1988 гг. Поэтому снижение урожайности в пределах средних цифр по Каракалпакстану нами отнесено на счет влияния прочих факторов, а часть снижения урожайности свыше средних показателей по Каракалпакстану считается непосредственным ущербом от усыхания Аральского моря и учитывается как фактор недополучения продукции.

В результате произведенного анализа выяснено, что по хлопку в указанных районах урожайность за весь исследуемый период не опускалась ниже, чем в среднем по

Каракалпакстану. По таким культурам как рис, кукуруза кормовая, овощи, бахчевые недополучение продукции рассчитано на основе изменения урожайности по сравнению со средними значениями за тот же период с использованием соответствующих цен, переведенных в долларовый эквивалент по курсам соответствующих лет. Потери рассчитаны по каждой культуре как общие за период среднегодовые. Общие потери производства продукции по вышеперечисленным культурам составили за период 1975-1999 гг. 123,26 млн. \$.



Рис. 2

Так, на рис. 2 видно, что из общих потерь в растениеводстве по зоне Приаралья, 54 % составляют потери от снижения урожайности в Тахтакупырском районе. Потери в остальных районах зоны Приаралья распределились следующим образом: Муйнакский район – 16 %, Кунградский – 18 %, Бозатаузский – 12 %. Видно, что практически половина ежегодных потерь в растениеводстве от снижения урожайности сельскохозяйственных культур происходит на землях Тахтакупырского района.

#### НЕДОПОЛУЧЕНИЕ ПРОДУКЦИИ ОТ СНИЖЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЖИВОТНОВОДСТВА

В ходе осуществления реформ в сельскохозяйственном секторе, поголовье скота переместилось на небольшие частные фермы и приусадебные участки.

В условиях Республики Каракалпакстан площади естественных пастбищно-сенокосных угодий занимают 4900 тыс. га (по состоянию на 1996 г.) и они в основном сосредоточены на территории Муйнакского, Кунградского, Бозатаузского, Караузякского и Тахтакупырского районов.

Относительно плотную концентрацию по выпасу скота в расчете на 1 га площади пастбищ имеют пастбищные массивы озерного типа Судочинско-Караджарская система, Дауткуль, Аспантай и Тогуз-торе. На этих пастбищах на 1 га приходится по 5-6 голов скота: крупный рогатый скот (КРС), овцы, козы, лошади, верблюды.

Изменение в поголовье скота в Каракалпакстане и зоне Приаралья идентично среднереспубликанским изменениям (табл. 3). Так, поголовье животных по Каракалпакстану остается относительно устойчивым. На фоне этого в Кунградском и Тахтакупырском районах выражено снижение поголовья овец и коз, особенно значительно в

Тахтакупырском районе. Учитывая, что поголовье овец и коз в этих районах составляет 24 % от общего поголовья этих видов животных в Каракалпакстане, сокращение стада в четырех районах Приаралья на 52 %, по сравнению 1990 годом, можно считать значительным.

**Таблица 3**

**Динамика поголовья животных во всех категориях хозяйств, тыс. голов**

Наименование/год	КРС	Овцы и козы	Верблюды	Лошади
<b>Узбекистан *)</b>				
1990	4580,8	9229,5	-	105,2
1995	5203,3	9322,3	22,8	150,0
1997	5370,6	9858,2	20,2	147,5
1999	5376,0	20300,7	17,7	150,5
<b>Каракалпакстан*)</b>				
1990	373,2	530,0	5,0	13,8
1995	386,5	485,9	5,0	18,1
1997	390,8	476,5	4,7	17,7
1999	379,8	497,4	4,5	16,9
<b>Муйнакский район **)</b>				
1990	16,4	5,3	-	4,6
1995	12,7	5,1	-	3,9
1997	11,9	5,3	-	2,8
1999	10,5	5,2	-	1,6
<b>Кунградский район **)</b>				
1990	26,5	71,9	0,8	0,8
1995	26,9	75,1	1,3	2,0
1997	26,7	57,9	1,2	1,5
1999	25,7	53,1	0,8	1,2
<b>Бозатаузский район **)</b>				
1990	36,7	9,2	0,1	0,8
1995	26,7	9,6	-	1,5
1997	25,5	9,1	-	1,5
1999	21,6	9,7	-	1,5
<b>Тахтакупырский **)</b>				
1990	11,5	142,2	0,5	1,2
1995	13,5	94,2	0,6	1,8
1997	13,1	55,0	0,5	1,9
1999	13,0	52,0	0,6	1,7

Источники: \*) - Государственное управление статистики.

\*\*) - Исследования ЭКО «Приаралье».

Известно, что в результате сокращения поступления речного стока в дельту реки и в связи с осушением огромных территорий бывшего морского дна резко сокращены площади естественных высокопродуктивных пастбищно-сенокосных угодий, что отрицательно влияет на развитие животноводства. В связи с прекращением поступления речного стока растительный покров подвергается деградации и деструкции. В резуль-



тате чего резко сокращаются источники кормов, снижается продуктивность животноводства, падает уровень получения приплода, сокращается поголовье скота.

Продуктивность животноводства в Каракалпакии так же, как и в целом по Узбекистану, снизилась в период после 1990 года. Производство мяса (в убойном весе) и молока в абсолютных показателях остается достаточно стабильным как по Каракалпакистану, так и по четырем районам зоны Приаралья с 1980 года. Состояние кормовой базы напрямую отражается на среднесуточном привесе животных, находящихся на откорме. Так, начиная с 1980-1985 гг. среднесуточный привес овец, находящихся на откорме сократился в Кунградском и Тахтакупырском районах более чем в 2 раза. Так же именно в этих районах произошло снижение в 2,5-3 раза среднесуточного привеса КРС. Эти факты на фоне снижения поголовья некоторых видов животных негативно отразились на продуктивности животноводства в зоне Приаралья.

Существенно снижены - практически в 2 раза - такие показатели продуктивности животноводства, как производство шерсти и производство каракульских шкур. Это объясняется, с одной стороны, значительным сокращением поголовья овец и коз в зоне Приаралья, а с другой стороны, является следствием ухудшения условий пастбищного животноводства, а так же состояния продуктивности пастбищ. Основные потери продукции животноводства приходятся на потери производства шерсти и каракульских шкур. Причем основные потери произошли в период после 1994 г., когда резко сократилось поголовье овец и коз, площади кормовых культур и их продуктивность. Потери продукции животноводства рассчитаны на основе снижения объемов заготовок шерсти и каракульских шкур, а так же производства продукции мяса за период 1990-1999 гг. с использованием цен соответствующих лет и применением компандирования. Суммарные потери продукции животноводства за указанный период составили 33,13 млн. \$. Поскольку установлено, что основное снижение продуктивности животноводства наблюдается по овце-производству, можно сделать вывод, что это является следствием изменения продуктивности пастбищ за счет усыхания Аральского моря.

## ВЫВОДЫ

Потери продукции в сельскохозяйственном секторе зоны Приаралья происходят за счет выбытия орошаемых земель, за счет снижения урожайности сельскохозяйственных культур и за счет падения продуктивности животноводства.



Рис. 3

Эти потери распределяются следующим образом: потери продукции от выбытия орошаемых земель составляют 42 %, потери от снижения урожайности сельскохозяйственных культур составили 46 %, потери продукции от снижения продуктивности животноводства, главным образом, овце-производства составили 12 % от общих потерь в сельскохозяйственном секторе (рис. 3). В среднем за год исследуемого периода потери от выпадения орошаемых земель по Каракалпакстану в целом составили 24,4 млн. \$., а по зоне Приаралья – 4,94 млн. \$. Потери в растениеводстве от сокращения урожайности сельскохозяйственных культур в среднем за год исследуемого периода с учетом компаундирования составили по зоне Приаралья 6,44 млн. \$., а в животноводстве – 8,40 млн. \$.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Оценка социально-экономических последствий экологического бедствия – усыхания Аральского моря. Совместный научный проект INTAS-RFBR № 1733. Промежуточный отчет, Москва-Вена-Ташкент, 2000.
2. Economic Evaluation of Environmental Impact: A Workbook (Parts I and II) published (1996) by Environmental Division, Office of Environment and Social Development, Asian development Bank, Manila, Philippines.

*Чолпанкулов Э.Д., Инченкова О.П.*

### **РАСЧЕТ ФАКТОРА СТРЕССА СЕЛЬХОЗКУЛЬТУР ИЗ-ЗА НЕДОПОДАЧИ ВОДЫ, ОСНОВАННОГО НА ИЗМЕРЕНИЯХ И С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ CROPWAT**

В орошаемом земледелии основным фактором получения высоких урожаев сельхозкультур является наличие поливной воды при условии эффективного ее использования при правильном понимании влияния орошения на урожай при различных условиях произрастания и различном обеспечении растений водой.

Зависимости между видом сельхозкультуры, климатом региона, почвой и наличием поливной воды являются комплексными и включают в себя множество биологических, физиологических, физических и климатических процессов.

Этому вопросу были посвящены многочисленные исследования, проводимые различными научными организациями центрально-азиатского региона. Для практических целей могут быть использованы зависимости урожая каждой сельхозкультуры от водоподачи на поле при количественной оценке максимального и фактического урожая - с одной стороны - и водопотребности сельхозкультуры и дефицита воды, испытываемого сельхозкультурой - с другой стороны. Дефицит воды, испытываемый растением, в результате которого развивается водный стресс, может привести к изменению развития растений и влияет на величину урожая данной сельхозкультуры.

Нашей задачей было определение коэффициентов стресса основных сельхозкультур для орошаемых районов центрально-азиатского региона: хлопчатника, люцерны, кукурузы (зерно), озимой пшеницы и овощей, т. е. определение степени влияния на урожай недоподачи воды в различные периоды вегетации рассматриваемой культуры.

При определении этих коэффициентов взято за основу следующее соотношение:

$$\Delta Y_{\phi} / Y_n = f(n_p, 1 - \Delta W_{\phi} / W_n)$$

где  $\Delta Y_{\phi}$  - потери урожая от фактической недоподачи воды, ц/га,  
 $Y_n$  - нормативный урожай, ц/га,  
 $W_n$  - нормативная водоподача для культур за вегетацию, м<sup>3</sup>/га,  
 $\Delta W_{\phi}$  - недоподача воды для культуры за вегетацию по сравнению с нормативной водоподачей, м<sup>3</sup>/га,  
 $n_p$  - показатель стресса культур за вегетацию.

При решении задачи по определению коэффициентов стресса культур были использованы многолетние натурные наблюдения, проводившиеся в республиках Центральной Азии, в частности, результаты обработки опытных данных института Узгидромелиоводхоз (бывш. Средазгипроводхлопок), Кыргызского научно-исследовательского института ирригации, Казахского научно-исследовательского института водного хозяйства. В результате обработки этих данных нами были получены (табл. 1) следующие зависимости для определения стрессовых коэффициентов за период вегетации для сельхозкультур: хлопчатник, люцерна, кукуруза (зерно), озимая пшеница и овощи, при этом величины отношений фактического и нормативного урожаев, недоподачи воды к нормативной водоподаче брались в долях единицы, а значение  $1 - \Delta W_{\phi} / W_n$  рассматривалось в пределах

$$0.5 \leq 1 - \Delta W_{\phi} / W_n \leq 0.9 ,$$

т. е. в случаях недоподачи воды от 10 до 50 % от нормативной водоподачи - наиболее возможных на практике. В этой таблице даются также значения коэффициентов корреляции между значениями фактической водоподачи ( $1 - \Delta W_{\phi} / W_n$ ) и фактической потери урожая  $\Delta Y_{\phi} / Y_n$ , а также стандартные ошибки предсказанных значений потерь урожая в полученных нами регрессионных уравнениях.

Таблица 1

**Регрессионные уравнения для определения  
коэффициентов стресса**

Культура	Вид уравнения	Коэф. коррел.	Стандартная ошибка
Хлопчатник	$\Delta Y_{\phi} / Y_n = -0.625(1 - \Delta W_{\phi} / W_n) + 0.663$	0.83	0.08
Люцерна	$\Delta Y_{\phi} / Y_n = -1.04 (1 - \Delta W_{\phi} / W_n) + 1.01$	0.99	0.042
Кукуруза (зерно)	$\Delta Y_{\phi} / Y_n = -0.99 (1 - \Delta W_{\phi} / W_n) + 0.93$	0.99	0.043
Озимая пшеница	$\Delta Y_{\phi} / Y_n = -1.126 (1 - \Delta W_{\phi} / W_n) + 1.053$	0.98	0.083
Овощи	$\Delta Y_{\phi} / Y_n = -0.997 (1 - \Delta W_{\phi} / W_n) + 0.938$	0.99	0.06

Для получения стрессовых коэффициентов по фазам развития для этих сельхозкультур была использована программа CROPWAT (ФАО). В ней зависимость урожая от водоподачи оценивается количественно с помощью коэффициента зависимости урожая  $K_y$ , который увязывает относительное уменьшение урожая с относительным дефицитом эвапотранспирации.

Полученные нами стрессовые коэффициенты для рассматриваемых сельхозкультур за период вегетации при различной водообеспеченности этих культур приведены в табл. 2.

Водный дефицит данной культуры, выраженный отношением фактической эвапотранспирации к максимальной, может иметь место постоянно в течении всего вегетационного периода культуры, либо в течении любого отдельного периода ее развития-вегетативного (1), начинающегося с сева или посадки, периода цветения (2), формирования урожая (3) или периода созревания (4) и оказывает разное влияние на потери урожая в зависимости от культуры и от фазы ее развития (табл. 3 взята из “Материалов по ирригации и дренажу“ ФАО, т. 33 “Зависимость урожая от воды“).

Проводя расчеты по программе CROPWAT, мы получили значения коэффициентов зависимости урожая  $K_y$  за все периоды вегетации для рассматриваемых культур. Прямая зависимость между коэффициентами  $K_y$  и  $n_p$ , определяющими уменьшение урожая от относительного дефицита эвапотранспирации и фактической водоподачи, позволяет определить “стрессовые” коэффициенты по фазам развития сельхозкультур, имея для них эти коэффициенты за весь период вегетации.

Таблица 2  
Значения коэффициентов стресса за период вегетации

Водопода- ча в долях слинны	Хлопчатник		Люцерна		Озимая пшеница		Кукуруза(з ( зерно )		Овощи	
	Потери урожая	Кoeff-нт стресса	Потери урожая	Кoeff-нт стресса	Потери урожая	Кoeff-нт стресса	Потери урожая	Кoeff-нт стресса	Потери урожая	Кoeff-нт стресса
0,9	0,1	0,11	0,07	0,08	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05
0,8	0,16	0,2	0,18	0,22	0,15	0,19	0,14	0,18	0,14	0,18
0,7	0,23	0,32	0,33	0,47	0,26	0,38	0,24	0,34	0,24	0,34
0,6	0,29	0,48	0,38	0,64	0,38	0,63	0,34	0,56	0,34	0,56
0,5	0,35	0,7	0,49	0,98	0,49	0,98	0,44	0,87	0,44	0,87

Таблица 3

Стадии развития культур, чувствительные к дефициту воды

Люцерна	Сразу после скашивания
Хлопчатник	Цветение и образование коробочки
Кукуруза	Цветение> наполнение зерна; цветение очень чувствительно, если перед ним не было дефицита воды
Пшеница	Цветение> формирование урожая> вегетативный период; озимая пшеница менее чувствительна, чем яровая пшеница
<u>Овощи</u>	
Капуста	В течение увеличения кочана и созревания
Лук	Стадия увеличения луковицы, особенно в течение быстрого роста луковицы> стадия вегетативного роста
Перец	В течение всего сезона, но особенно перед самым началом и в начале цветения
Картофель	Период развития подземных побегов и стимулирования формирования клубня, формирование урожая > начало вегетативной стадии и созревание
Томаты	Цветение> формирование урожая > вегетативный период, особенно в течение и сразу после пересадки
Арбузы	Цветение, наполнение плода> вегетативный период, особенно в течение развития плетей

Ниже приводятся полученные нами таблицы значений “стрессовых” коэффициентов в зависимости от водоподачи за весь период вегетации (табл. 4-8).

Таблица 4

Значения потерь урожая и стрессовых коэффициентов ( за сезон и по фазам развития ) в зависимости от водоподачи ( хлопчатник )

Варианты	Потери урожая ( в долях ед.)					Стрессовые коэффициенты				
	сезон	I	II	III	IV	сезон	I	II	III	IV
100%	0,1	0,02	0,03	0,03	0,02	0,11	0,03	0,03	0,03	0,03
100	0,16	0,04	0,04	0,05	0,03	0,21	0,05	0,05	0,06	0,05
107	0,23	0,05	0,05	0,07	0,05	0,32	0,07	0,07	0,1	0,07
108	0,29	0,07	0,07	0,09	0,06	0,5	0,12	0,12	0,15	0,11
109	0,35	0,08	0,08	0,11	0,08	0,7	0,16	0,16	0,22	0,16

Таблица 5

Значения потерь урожая и стрессовых коэффициентов ( за сезон и по фазам развития ) в зависимости от водоподачи ( люцерна )

Варианты	Потери урожая ( в долях ед.)					Стрессовые коэффициенты				
	сезон	I	II	III	IV	сезон	I	II	III	IV
100%	0,07	0,07				0,08	0,08			
100	0,18	0,18				0,22	0,22			
107	0,33	0,33				0,47	0,47			
108	0,39	0,39				0,64	0,64			
109	0,49	0,49				0,98	0,98			

Таблица 6

Значения потерь урожая и стрессовых коэффициентов ( за сезон и по фазам развития ) в зависимости от водоподачи ( озимая пшеница )

Варианты	Потери урожая ( в долях ед.)					Стрессовые коэффициенты				
	сезон	I	II	III	IV	сезон	I	II	III	IV
100%	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,01	0,02	0,01	0,01
100	0,16	0,02	0,05	0,05	0,04	0,19	0,02	0,07	0,05	0,05
107	0,26	0,03	0,09	0,08	0,06	0,38	0,04	0,13	0,11	0,09
108	0,38	0,05	0,13	0,11	0,09	0,64	0,08	0,22	0,19	0,15
109	0,49	0,06	0,17	0,14	0,11	0,98	0,12	0,34	0,29	0,23



Таблица 7

Значения потерь урожая и стрессовых коэффициентов ( за сезон и по фазам развития ) в зависимости от водоподачи ( кукуруза )

Водоподача в дол.ед.	Потери урожая ( в долях ед.)					Стрессовые коэффициенты				
	сезон	I	II	III	IV	сезон	I	II	III	IV
0,9	0,05	0,01	0,01	0,02	0,01	0,05	0,01	0,01	0,02	0,01
0,8	0,14	0,02	0,02	0,07	0,03	0,18	0,02	0,03	0,09	0,04
0,7	0,24	0,04	0,04	0,12	0,04	0,34	0,05	0,05	0,17	0,07
0,6	0,34	0,05	0,06	0,17	0,06	0,56	0,08	0,09	0,28	0,11
0,5	0,44	0,07	0,07	0,22	0,08	0,87	0,13	0,14	0,44	0,16

Таблица 8

Значения потерь урожая и стрессовых коэффициентов ( за сезон и по фазам развития ) в зависимости от водоподачи ( овощи )

Водоподача в дол.ед.	Потери урожая ( в долях ед.)					Стрессовые коэффициенты				
	сезон	I	II	III	IV	сезон	I	II	III	IV
0,9	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01
0,8	0,14	0,02	0,05	0,05	0,02	0,17	0,03	0,06	0,06	0,02
0,7	0,24	0,04	0,08	0,09	0,03	0,34	0,06	0,12	0,12	0,04
0,6	0,34	0,06	0,09	0,15	0,04	0,57	0,11	0,15	0,25	0,06
0,5	0,44	0,08	0,12	0,19	0,05	0,88	0,166	0,242	0,38	0,092



Таким образом, методика получения “стрессовых” коэффициентов для каждой рассматриваемой сельхозкультуры заключается в следующем:

1. Необходимо иметь данные натуральных наблюдений потерь урожая в зависимости от водопада для каждой конкретно взятой сельхозкультуры в данном регионе;
2. Получить соответствующее регрессионное уравнение, по которому можно вычислить  $p_r$  за весь период вегетации;
3. Используя (из программы CROPWAT) значения коэффициентов зависимости урожая  $K_u$  за весь период вегетации и по каждой фазе в отдельности, или определив их для интересующего нас региона по данным натуральных наблюдений, имея значения  $p_r$  за весь период вегетации, можно вычислить соответствующие “стрессовые” коэффициенты для культуры по фазам ее развития.

При этом надо учесть также особенности расчета потерь урожая по программе CROPWAT для разных сельхозкультур:

а) Потери урожая за весь вегетационный период зависят от значений  $K_u$  как за весь вегетационный период, так и в каждой фазе ее развития, а значения этих коэффициентов в программе CROPWAT не всегда соответствуют условиям центрально-азиатского региона. Так для хлопчатника потери урожая в программе зависят от значений  $K_u$  в третьей и четвертой фазах развития, что, вероятно, обусловлено применением программы в регионах, не испытывающих водного дефицита в начальных фазах развития этих сельхозкультур.

б) Влияние недоподачи воды на урожай для люцерны за сезон тождественны потерям урожая на первой фазе развития.

в) Потери урожая за сезон для кукурузы (зерно) тождественны потерям урожая на третьей фазе развития (при недоподачах  $\Delta W_f / W_n$ , равных 0,1 и 0,2, а при больших недоподачах оказывает влияние и четвертая фаза развития), недоподачи в первой и второй фазах не учитывают уменьшения урожая.

г) Для озимой пшеницы влияние недоподачи воды на урожай определяется только четвертой фазой развития, т. е. при отсутствии осадков и поливов количественные потери урожая программой не определяются.

д) Для овощей влияние недоподачи воды на урожай, в основном, оценивается в третьей и четвертой фазах развития.

Для использования в полной мере программы CROPWAT для условий Центральной Азии необходима соответствующая ее корректировка согласно приведенным в данной работе стрессовым коэффициентам  $p_r$ .

*Пинхасов М.А.*

## **ОПЫТ ОРГАНИЗАЦИИ, ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АССОЦИАЦИЙ ВОДОПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ**

Анализ результатов деятельности сельхозпредприятий в странах Центральной Азии за последние годы с началом процесса реструктуризации бывших совхозов и колхозов показывает повсеместное снижение продуктивности орошаемых земель.

Известно, что на “продуктивность орошаемых земель” влияет множество факторов: оснащенность основными фондами, использование устойчивых семян, современное проведение комплексных агротехнических мероприятий, мелиоративное состояние орошаемых земель, водообеспеченность, минерализация оросительной воды и т. д.

Если выделить несколько факторов, формирующих продуктивность земель, а именно: состояние мелиорируемых земель, оросительной и коллекторно-дренажной сети, водообеспеченность и проведение промывных, влагозарядковых и вегетационных поливов, то можно увидеть, как во многих хозяйствах, в том числе на вновь организованных на базе бывших совхозов и колхозов, оросительная и коллекторно-дренажная сеть нуждается в реконструкции, в проведении ремонтно-восстановительных работ, очистке, замене отдельных узлов и т. д.

Применительно к условиям Республики Казахстан, Кыргызской Республике и вообще в странах ЦА, наиболее неблагоприятная обстановка сложилась на внутрихозяйственных оросительных системах, обязанная в первую очередь процессом реструктуризации в сельском хозяйстве и несовершенством организации и финансирования внутрихозяйственной сети. Так, до реструктуризации сельскохозяйственных предприятий здесь одно управление водохозяйственных систем (УВХС) обеспечивало оросительной водой 30-40 водопотребителей. В новых условиях одно УВХС должно обеспечить водой несколько тысяч водопотребителей. К примеру, в Мактааральском районе ЮКО на 1.01.1999 г. имелось 9486 крестьянских, 416 - кооперативных и 31 - государственных хозяйств. Такая раздробленность хозяйств не позволяет УВХС в полной мере обеспечить регулирование, распределение и использование водных ресурсов для всех категорий водопотребителей.

В новых условиях большая часть внутрихозяйственной сети бывших совхозов и колхозов превращаются как бы в межхозяйственную оросительную и коллекторно-дренажную сеть. Таким образом, возникла проблема управления водными ресурсами на всех уровнях иерархии, особенно на нижнем уровне, связанные с поддержанием и эксплуатацией внутрихозяйственной сети, мелиорированием земель.

Возникли трудности с эксплуатацией прежде всего тех каналов и других ирригационно-мелиоративных сооружений, которые используются двумя и более фермерскими, крестьянскими хозяйствами.

Показателен пример Джетысайской зоны Южно-Казахстанской области. Здесь на площади 40.6 тыс. га объем очистки внутрихозяйственных каналов снизился с 463 тыс. м<sup>3</sup> в год до 25 тыс. м<sup>3</sup> в год; в то же время очистка межхозяйственной сети снизилась с 343 тыс. м<sup>3</sup> в год до 112 тыс. м<sup>3</sup>; очистка межхозяйственной КДС - с 684 тыс. м<sup>3</sup> в год до 62 тыс. м<sup>3</sup>; внутрихозяйственной КДС - с 30 тыс. м<sup>3</sup> до нуля. Из 286 скважин вертикального дренажа работает лишь 8. В результате водоподача в хозяйства снизилась с 345.5 млн. м<sup>3</sup>/год до 245 млн. м<sup>3</sup>/год, дренажный сток на границе системы -

с 105.4 млн. м<sup>3</sup>/год до 60.5 млн. м<sup>3</sup>/год. Если до 1991 года площадь средnezасоленных земель составляла 3.5 %, то в 1997 г. она составила 18.2 %, до 1991 г. площади сильнозасоленных земель вообще отсутствовали, а в 1997 г. - они составили уже 4.5 %.

В целом, если по оросительной сети мы наблюдаем увеличение отклонений разницы между заявленной и плановой водоподачей, то по дренажной сети имеет место полное невнимание бывших сельскохозяйственных органов к ее состоянию и абсолютная невозможность фермеров оплачивать затраты по поддержанию и работе дренажной сети.

Постепенно “раковая опухоль” засоления и заболачивания распространяется по всему региону.

Такое положение способствовало снижению качества эксплуатации внутрихозяйственной ирригационно-мелиоративной сети, сокращению затрат на нее, снижению водоподачи на орошаемые поля в необходимом объеме и режиме, ухудшению водоотведения и мелиоративного состояния земель. Все это в конечном итоге привело к снижению урожайности сельскохозяйственных культур.

В этих условиях создание организационно-производственной структуры, которая бы проводила в жизнь интересы водопользователей по водораспределению, по поддержанию оросительной и коллекторно-дренажной сети, явилась бы представителем водопользователей в водохозяйственных системах, становится весьма актуальным и такой организационной структурой могла бы стать Ассоциация водопользователей (АВП).

Весьма показателен опыт организации АВП в Кыргызстане. Здесь на добровольной и демократической основе - решением собрания учредителей из физических и юридических лиц создаются АВП по территориальному признаку, т.е. вновь организованные хозяйства объединяются в ассоциацию в пределах бывших совхозов и колхозов.

В Кыргызской республике в 1996-1998 гг. создано 50 АВП с площадью обслуживания 91.8 тыс. га орошаемых земель. Кроме того, функционирует 130 неформальных (без статуса юридических лиц) АВП с площадью обслуживания 125 тыс. га орошаемых земель. Площадь обслуживания земель одной АВП составляет 1-3 тыс. га при средней площади 1.8 тыс. га.

В опыте Кыргызской Республики по организации АВП обращают на себя внимание следующие положения, устанавливающие:

- передачу на баланс АВП не только сооружений и каналов, но и передачу полосы отводов земель, предназначенных для эксплуатации каналов, КДС, прудов и водоемов;
- право на продажу сэкономленной воды в результате проведенных водосберегающих технологий;
- систематическое взаимодействие с органами местной государственной администрации, природоохранными, землеустроительными и другими заинтересованными организациями по вопросам водных и земельных отношений;
- предотвращение и выявление случаев нарушений водного и земельного законодательства со стороны членов АВП, предъявить к виновным лицам иски по возмещению ущерба потерпевшим сторонам;
- предъявление иска и претензий к государственным, коммерческим и иным организациям, предприятиям и учреждениям в случае нарушения ими водного законодательства, договора и соглашений с участием ассоциаций и требовать в установленном порядке их удовлетворения;
- прекращение водоподачи или применение других санкций, предусмотренные решением общего собрания учредителей к членам ассоциации - нарушителям водного законодательства, устава и неплательщикам;

- осуществление приемки строительных, ремонтных и других видов работ, выполняемых по договорам и соглашениям на ирригационной сети ассоциации;
- ведение в установленном порядке статистической и оперативной отчетности об использовании вод, орошаемых и мелиорируемых земель;
- проведение мероприятий по сокращению потерь воды и предотвращение сверхплановых сбросов воды из ирригационной сети ассоциаций.

Вместе с тем, в кыргызских документах по организации АВП имеются ряд неточностей и недоработок.

1. Так, в п.11 “Положения об АВП в сельской местности” предлагается создать АВП в пределах гидрографических границ бассейна реки. Это не реально. АВП может при определенных условиях раздвинуть свои границы до оросительной системы включительно. А в гидрографических границах бассейна можно создать федерацию АВП.

2. Из документов не видно, как предполагается производить расчеты за оказываемые АВП услуги фермерам. Неясно, как будут рассчитываться фермеры, имеющие разные в мелиоративном отношении земли: незасоленные, слабозасоленные или засоленные, которые потребуют различных усилий по подаче воды, проведению мелиоративных мероприятий и, следовательно, затрат.

Будет единая ставка для всех членов АВП по оказанию услуг или разная?

3. Не ясно, по какой цене думали реализовать сэкономленную воду в результате водосберегающей технологии - по рыночной, по цене, отпускаемой оросительной системе или иной?

4. Перенимая опыт Кыргызстана, хотелось бы знать, предусматривается ли государственная поддержка АВП в виде безвозмездной помощи, субсидий, льготных налогообложения и кредитования. За счет каких средств намечается произвести реконструкцию внутрихозяйственной оросительной сети?

К сожалению, мы не смогли увидеть из Кыргызских материалов, как определяется мера ответственности АВП и водопользователей за состояние ирригационно-мелиоративной сети, орошение и мелиорацию земель. За счет каких мер и средств обеспечивается ответственность АВП?

Следует отметить, что слабым звеном при создании и функционировании АВП и в Казахстане и в Кыргызстане явилось освещение мелиорации орошаемых земель. Вопрос стоит таким образом: что должны делать АВП для мелиоративного обслуживания? По каким критериям следует оценить работу АВП по мелиоративному обслуживанию?

Зона охвата АВП управлением оросительной и коллекторно-дренажной сети нам представляется 2<sup>х</sup> этапной.

На первом этапе зона действия АВП распространяется только на внутрихозяйственную сеть. На втором с учетом полученного опыта организации и работы АВП и проведения мероприятий по приватизации межхозяйственной сети зону действия АВП можно распространить на всю оросительную сеть.

Опыт создания АВП в Казахстане и Кыргызстане показывает, что инициатором по созданию АВП становится Управление водохозяйственных систем, которое непосредственно взаимодействует с водопотребителями с привлечением самих водопользователей. Причиной этому служит и то, что по Уставу Управление водохозяйственных систем осуществляет контроль за техническим состоянием внутрихозяйственной оросительной и коллекторно-дренажной сети, мелиоративным состоянием орошаемых земель и эффективным использованием оросительной воды. Наряду с этим реструктуризация сельского хозяйства значительно увеличило число водопользователей. А в условиях создания АВП УВХС имеют возможность входить в договорные отношения не с многочисленной армией водопользователей, а только с АВП, которая в свою очередь

входит в договорные отношения со своими членами - мелкими водопотребителями. Конечно, инициатором по созданию АВП должны быть и представители водопользователей - фермеры и другие водопользователи.

В задачу инициативной группы (представители водопользователей и районной водохозяйственной организации) по созданию АВП входит:

- разъяснение потенциальным членам целей и задач АВП;
- предварительное рассмотрение (до общего собрания АВП) заявлений о приеме в АВП;
- разработка положений к Уставу АВП;
- определение финансово-экономической базы при формировании и функционировании АВП;
- структура АВП;
- подготовка к общему собранию АВП, в котором рассматриваются вопросы, связанные с организацией АВП (учредительный договор, Устав и прочие документы, предусмотренные законодательством при регистрации АВП).

Территориальные размеры АВП являются одним из важных элементов организации. При их определении необходимо исходить из ряда условий. Одним из основных условий являются экономические возможности АВП по содержанию внутриводхозяйственных оросительно-мелиоративных систем в нормальном техническом состоянии.

С этих позиций, чем больше орошаемых земель в ведении АВП, тем больше у нее финансовых возможностей и наоборот. В этом случае при прочих равных условиях ниже удельные затраты.

Однако, слишком большие размеры орошаемых площадей или большая численность членов АВП приводит к усложнению ее организационной структуры и снижению эффективности управления.

В этом случае может возникнуть опасность утратить непосредственный контроль членов ассоциаций над АВП и взаимный контроль членов АВП между собой.

Зоной действия АВП должна быть по возможности единая водохозяйственная система, включающая в себя водозабор, водоподачу и водоотведение.

Основными задачами АВП являются поддержание и эксплуатация внутриводхозяйственных оросительной и коллекторно-дренажной сети, обеспечение равномерного распределения воды между водопотребителями и разработка комплекса мер, направленных на улучшение мелиоративного состояния земель.

Выполнение основных задач АВП осуществляет следующими видами деятельности:

- разрабатывает план водопользования в пределах обслуживаемой ею площади земель и хозяйств;
- обеспечивает равномерную водоподачу членам АВП - фермерским, крестьянским, арендным и другим сельскохозяйственным предприятиям согласно их лимиту по водоподаче;
- содержит в технически исправном состоянии оросительные каналы и сооружения на них, коллекторно-дренажную сеть, насосные станции и установки, ремонтное оборудование, механизмы и технику, находящихся в ведении АВП;
- контролирует правильность водоизмерительных приборов на водовыделах между хозяйствами-водовыделами;
- способствует улучшению мелиоративного состояния орошаемых земель, не допускает их засоления, заболачивания и иного ухудшения. (Предоставление мелиоративных услуг АВП водопользователям осуществляется по следующим основным показателям: обеспечение проектного уровня дренажного модуля водоотведения, что со-

ответственно должно поддерживать оптимальный уровень грунтовых вод и показатель допустимости засоленности почвогрунтов в метровом слое);

- организует мастерские и цеха для проведения ремонтных работ техники, механизмов, измерительных приборов и другого оборудования, необходимых при эксплуатации внутрихозяйственной оросительной и коллекторно-дренажной сети;
- определяет тарифы за оказываемые водохозяйственные услуги членам АВП в соответствии с размером обслуживаемой площади с учетом проведения ремонтных работ по результатам дефектных актов, составленных АВП совместно с членами АВП;
- осуществляет функции консультативной службы по агротехническим приемам возделывания сельскохозяйственных культур за определенную плату.

Финансовую основу АВП составляют денежные и материальные взносы членов АВП, субсидии государства, а также кредиты банков и других организаций и учреждений.

Экономические взаимоотношения АВП с Управлением водохозяйственных систем в основном проявляются при платном водопользовании и сверхлимитном водопользовании или сверхнормативном загрязнении водных источников.

На наш взгляд, в числе других экономических взаимоотношений АВП с государством могли бы быть несколько направлений:

- при единовременной безвозмездной помощи в период создания АВП;
- при льготном кредитовании;
- при налогообложении.

Как правило, при создании АВП члены АВП свою внутрихозяйственную оросительную и коллекторно-дренажную сеть передают на баланс АВП.

Реконструкция внутрихозяйственной оросительной и коллекторно-дренажной сети, находящихся на балансе АВП, может быть осуществлена за счет финансирования из государственного бюджета при осуществлении государственной поддержки агропромышленного сектора экономики.

Высшим органом АВП является общее собрание участников.

В АВП создается исполнительный орган, осуществляющий ее деятельность и подотчетный общему собранию его членов.

В качестве исполнительных органов могут быть: Правление, Наблюдательный совет или другие органы по решению общего собрания.

Для контроля за деятельностью исполнительного органа общее собрание участников вправе создать Ревизионную комиссию, которая осуществляет контроль и проверку финансово-хозяйственной деятельности органа.

АВП в период своей деятельности:

- систематически взаимодействует с органами местной государственной администрации, природоохранными, землеустроительными и другими заинтересованными организациями по вопросам водных и земельных отношений;
- предотвращает и выявляет случаи нарушений водного и земельного законодательства со стороны членов АВП, предъявлять к виновным лицам иски по возмещению ущерба потерпевшим сторонам;
- прекращает водоподачу или применяет другие санкции (по решению общего собрания учредителей) к членам ассоциации - нарушителям водного законодательства, устава и неплательщикам;
- проводит мероприятия по сокращению потерь воды и предотвращению сверхплановых сбросов воды из ирригационной сети ассоциаций.

Для того, чтобы АВП могла успешно выполнить возложенные на нее задачи, необходимо: во-первых, оснастить ее специальными механизмами, техникой и оборудованием; во-вторых, там, где необходимо, произвести реконструкцию оросительной и

коллекторно-дренажной сети, находящейся на балансе АВП. Известно, что современное экономическое положение сельхозпредприятий - членов АВП не позволяют им осуществить затратноое финансирование на эти цели. Эту проблему, на наш взгляд, можно решить, с одной стороны, за счет государственной финансовой поддержки сельхозпроизводителей, и с другой - за счет предоставления им на эти цели льготного долгосрочного кредитования.

*Гловацкий О.Я., Коваленко Г.П., Талипов Ш.Г., Тий Л.В.*

## **НОВЫЕ ПРОГРАММНЫЕ МОДУЛИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КРУПНЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ**

Техническое состояние насосных агрегатов определяется сравнением фактических параметров, получаемых путем измерений, с расчетными, полученными из характеристик.

Критериями оценки технического состояния осевых насосов являются предельные отклонения по напору и КПД (коэффициент полезного действия) от паспортного значения. В процессе эксплуатации допускаются отклонения по напору в пределах  $\pm 3\%$  для насосов моделей 2, 3, 5, 10 и 11 и  $+ 5\%$  для насосов моделей 6 и 16. При падении напора свыше  $7\%$  и снижении КПД более  $3\%$  техническое состояние насоса считается неудовлетворительным и дальнейшая эксплуатация запрещается.

Критериями оценки технического состояния центробежных насосов являются предельные отклонения по подаче и КПД от паспортного значения. При эксплуатации допускается отклонение подачи от расчетных величин не более  $\pm 2\%$ . Эксплуатация центробежного насоса прекращается при снижении подачи более  $2\%$  и снижении КПД более  $3\%$ .

Основные параметры насоса (напор, подача, мощность, КПД) определяются расчетным путем на основании предварительных измерений необходимых величин.

Коэффициент полезного действия насоса определяется как отношение полезной мощности насоса к мощности, потребляемой насосом:

$$\eta_n = N_i / N$$

Коэффициент полезного действия насосной установки:

$$\eta_{н.уст.} = a \eta_{пер} \eta_{дв.} \eta_n$$

где  $\eta_{пер}$  - коэффициент полезного действия передачи от двигателя к насосу;

$\eta_{дв.}$  - коэффициент полезного действия двигателя;

$\eta_n$  - коэффициент полезного действия насоса;

$a$  - коэффициент, учитывающий особые условия установки.

Полезная (гидравлическая) мощность насоса рассчитывается по формуле:

$$N_i = (\gamma Q H) / 102 \quad (\text{кВт})$$

с учетом того, что для воды:  $\gamma = 9806,65 \text{ н/м}^3$

$$N_i = 9,81 Q H \text{ (кВт)}$$

где  $Q$  – подача насоса ( $\text{м}^3/\text{с}$ )

$H$  – напор насоса (м)

Мощность, потребляемая насосным агрегатом, может быть определена одним из следующих способов:

- штатным ваттметром,
- по показаниям вольтметра и амперметра,
- методом подключения двух ваттметров,
- комплектом приборов типа К-51.

Потребляемая мощность вычисляется по формуле:

$$N_{дв.} = K_{тт} K_{тн} C_w W 10^{-3}$$

где  $K_{тт}$  – коэффициент трансформации тока

$K_{тн}$  – коэффициент трансформации напряжения

$C_w$  - постоянная прибора, Вт/дел.

$W$  - показания прибора, дел.

По следующей формуле рассчитывается электроэнергия, потребляемая каждым агрегатом:

$$E_i = (p_i^k - p_i^n) * 20000$$

где  $p_i^k$  - показания счетчика в конце расчетного периода

$p_i^n$  - показания счетчика в начале расчетного периода

Следующим шагом мы можем просчитать КПД  $i$ -го блока:

$$\eta_{н.уст. i} = (9,81 * q_i * (h + dH_i) * T_i) / E_i$$

где  $T_i$  - число часов работы агрегата за расчетный период

Из формулы  $\eta_{н.уст.} = a \eta_{пер} \eta_{дв.} \eta_{н.}$  можно определить  $\eta_{н.}$  (КПД насоса).

Показатель технического состояния насоса является функцией от уровня КПД насоса и углом разворота лопастей двигателя:

$$dTS = f(\Psi_{ур}, \eta_{н..})$$

где  $\Psi_{ур}$  – угол разворота лопастей двигателя (берется из оперативной суточной ведомости).

Основным критерием технического состояния насосной станции считаем ее КПД. В рамках общей схемы оптимизации эксплуатационных параметров автоматизированной системы контроля и диагностики для насосной станции, специалистами лаборатории насосных станций и установок САНИИРИ и НИЦ МКВК разработана имитационная математическая модель блока насосной станции и программа для расчета КПД насосного агрегата для одной НС за определенный период работы.

Целью программы является расчет КПД насоса, блока, электродвигателя и других показателей работы одной НС при заданном расходе за определенный период вре-



мени. Это облегчает планирование оптимальной продолжительности работы станции и энергетических затрат, особенно при достижении предельного срока службы.

Разработка алгоритма программы расчета КПД на НС проводилась при проведении обследования технического состояния каскада НС КМК (Каршинский магистральный канал), апробация программы - на основе натурных данных по НС-2 за июль (вегетационный период) по среднегодовым значениям за 1995-1999 гг.

Ниже приводятся основные шаги алгоритма программы расчета КПД насоса на одной насосной станции за определенный период работы, которая может быть использована в качестве типовой для всех мелиоративных НС центрально-азиатского региона.

**1<sup>й</sup> шаг:** Считываются входные оперативные данные за выбранный период времени (обычно месяц) и нормативно-справочные данные (например, по НС-2 КМК)

**2<sup>й</sup> шаг:** Рассчитывается средняя отметка в нижнем бьефе по всем введенным наблюдениям нижнего бьефа (данные за выбранный период времени):

$$SrUrovenNB$$

**3<sup>й</sup> шаг:** Рассчитывается средняя отметка в верхнем бьефе по всем введенным наблюдениям верхнего бьефа:

$$SrUrovenVB$$

**4<sup>й</sup> шаг:** Рассчитывается геометрическая высота подъема:

$$HightAscent = SrUrovenVB - SrUrovenNB$$

**5<sup>й</sup> шаг:** Рассчитывается средняя активная мощность для каждого агрегата насосной станции по всему введенному массиву показаний стационарных приборов:

$$Nsr(i) ; i = 1 \dots KA$$

где:  $i$  - текущий рабочий агрегат;  $KA$  - количество рабочих агрегатов.

**6<sup>й</sup> шаг:** Рассчитывается средняя активная мощность за расчетный период, при  $KA = const$ , для всей насосной станции:

$$SumNsr = [Nsr(1) + Nsr(2) + \dots + Nsr(KA)] / KA;$$

**7<sup>й</sup> шаг:** Рассчитывается средняя подача каждого агрегата:

$$QS = QNS / KA;$$

где:  $QNS$  – подача всей НС

**8<sup>й</sup> шаг:** Рассчитываются КПД всех электродвигателей:

8.1 Строятся линейные уравнения зависимости между мощностью и КПД электродвигателя по точкам, взятым из его паспортных данных:

$$\text{КПД}_{\text{эл.двигателя}} = f(\text{Мощность}_{\text{эл.двигателя}})$$

8.2 Используя полученные функциональные зависимости полученные в п. 8.1, для каждого  $i$  - го агрегата находится КПД его электродвигателя:

$$EL(i) = f(Nsr[i])$$

где:  $Nsr[i]$  - определено в п. 5

**9<sup>й</sup> шаг:** Рассчитывается относительная мощность каждого агрегата:

$$NOA(i) = Nsr(i) / \text{SumNsr}$$

где:  $\text{SumNsr}$  - определено в п. 6

**10<sup>й</sup> шаг:** Рассчитывается подача  $i$ -го насосного агрегата:

$$Q(i) = QS * NOA(i)$$

**11<sup>й</sup> шаг:** Рассчитываются потери  $i$ -го трубопровода:

$$DH(i) = 0,00078 * Q^2(i)$$

**12<sup>й</sup> шаг:** Рассчитывается полный напор насоса для  $i$ -го агрегата:

$$H(i) = \text{HightAscent} + DH(i)$$

**13<sup>й</sup> шаг:** КПД  $i$ -го трубопровода:

$$TR(i) = \text{HightAscent} / H(i)$$

**14<sup>й</sup> шаг:** Рассчитывается электроэнергия, потребляемая каждым агрегатом:

$$E(i) = [PK(i) - PN(i)] * 20000$$

где: 20000 - коэффициент пересчета,  
 $PK(i)$  - показания счетчика в конце периода,  
 $PN(i)$  - показания счетчика в начале периода.

**15<sup>й</sup> шаг:** КПД  $i$ -го блока:

$$BL(i) = [ 9,81 * Q(i) * H(i) * T(i) ] / E(i)$$

где:  $T(i)$  - число часов работы  $i$ -го агрегата за расчетный период

**16<sup>й</sup> шаг:** КПД  $i$ -го насоса:

$$EN(i) = BL(i) / [ TR(i) * EL(i) ]$$

**17<sup>й</sup> шаг:** Расчет показателя технического состояния насоса:

17.1 Строятся линейные уравнения зависимости между углом разворота лопастей  $i$ -го агрегата и минимальным допустимым значением КПД  $i$ -го агрегата, взятым из паспортных данных насоса.

Расчет производится с помощью следующей таблицы:

угол разворота лопастей $i$ -го агрегата	минимально-допустимое значение КПД $i$ -го агрегата
-9	0,83
-6	0,855
-3	0,87
0	0,875

17.2 Для  $i$ -го агрегата, по углу разворота лопастей, определяется минимальное допустимое значение КПД  $i$ -го насоса.

Это значение умножается на 0,97 % и затем сравнивается с полученным на 16<sup>м</sup> шаге значением КПД  $i$ -го насоса. Тем самым определяется возможность предотвращения снижения КПД на 3 % по сравнению с каталожными данными.

**18<sup>й</sup> шаг:** Заключение о техническом состоянии насоса:

Техническое состояние  $i$ -го насоса считается удовлетворительным, если полученное на 16<sup>м</sup> шаге значение КПД  $i$ -го насоса превышает значение КПД  $i$ -го насоса, полученное с помощью таблицы на 17<sup>м</sup> шаге.

**19<sup>й</sup> шаг:** Заключение о динамике технического состояния насоса:

Если КПД  $i$ -го насоса падает более чем на 2 % по сравнению с предыдущим месяцем, то, как и в 18<sup>м</sup> шаге, на пульт и диспетчеру подается предупредительный сигнал.

Приведенный алгоритм программы расчета КПД работы насосных агрегатов на насосной станции является типовым и может быть применен на любой НС с минимальными изменениями или дополнениями, при условии что угол разворота лопастей насоса меняется не чаще чем один раз за расчетный период времени. Если угол разворота изменяется чаще, то для использования данного алгоритма при анализе технического состояния насосных агрегатов рекомендуется просто уменьшить расчетный период времени.

Внедрение системы оценки технического состояния на крупных НС позволит оперативному персоналу анализировать и прогнозировать динамику изменения всех основных параметров агрегатов, а также предупреждать развитие аварийных ситуаций.

В условиях исчерпания ресурса на основных системах машинного водоподъема, резкого удорожания ресурсов новые программные модули позволят значительно повысить надежность и экономичность эксплуатации НС.

*Беглов И.Ф., Гловацкий О.Я., Исаков Х.Х., Талипов Ш.Г.*

## **АНАЛИЗ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ**

Решение задач технической диагностики тесно связано с прогнозированием надежности на ближайший период эксплуатации (до следующего технического осмотра). Решения обычно основываются на моделях отказов.

Вторым важным направлением технической диагностики является теория контролеспособности. Под контролеспособностью понимается свойство объекта обеспечивать достоверную оценку его технического состояния и раннее обнаружение неисправностей и отказов. Контролеспособность обеспечивается конструкцией объекта и принятой системой технической диагностики.

Крупной задачей теории контролеспособности является изучение средств и методов получения диагностической информации. В сложных технических системах используется автоматизированный контроль состояния, которым предусматривается обработка диагностической информации и формирование управляющих сигналов. Другими не менее важными задачами этой теории являются разработка алгоритмов поиска неисправностей, разработка диагностических тестов, минимизация процессов установления диагноза.

Роль диагностики в управлении процессом заключается в установлении границ и условий, в которых допускается или происходило протекание процесса, обнаружении и прогнозе выхода параметров процесса за установленные границы. К роли диагностики также относится уточнение и изменение границ по мере получения дополнительной информации о процессе. Применение диагностики особенно актуально при выявлении и последующем устранении сравнительно редких, но опасных неисправностей, выявляющихся в эксплуатации насосных агрегатов.

Значительное число дефектов насосных агрегатов в процессе их работы составляют прочностные дефекты. По данным В.А. Карасева и А.Б. Ройтмана [1], они составляют более 60 %, причем большая часть из них связана с вибрацией. Поэтому особая роль в диагностике подобных дефектов принадлежит вибрационным методам. В отличие от многих других методов диагностики вибродиагностика позволяет не только обнаружить неисправность, но и выявить ее причины, например повышенные динамические нагрузки или переменные напряжения.

Основной подход к решению поставленных задач состоит в следующем. Используя упрощенные математические модели колебаний в динамических системах и широкие экспериментальные исследования единичных объектов, получают информацию о диагностических признаках, например, опасных колебаниях. На ее основе оценивают состояние всего парка эксплуатируемых машин. Кроме того, используя статистику для парка машин и результаты их диагностирования, проводят коррекцию моделей исследуемой системы, параметров ее состояний и их диагностических признаков, т. е. реализуют обратную связь на основе диагностирования парка машин.

На практике наиболее распространен приближенный метод определения остаточного ресурса, когда состояние насосного агрегата определяется детерминированными параметрами.

Предположим, что работа агрегата определяется многомерной функцией вида  $F(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$  и эта функция контролируется на отрезке времени нормальной экс-

платации от 0 до  $t_n$  (область  $T_3$ ).

Тогда значения этой функции в отдельные моменты времени будут

$$F(t_0), F(t_1), F(t_2), \dots, F(t_n).$$

Задача прогнозирования заключается в том, чтобы, зная значения функции в прошлом и настоящем ( $t_i \in T_3$ ), предсказать значения функции в будущие моменты времени, т. е. определить  $F(t_n \rightarrow 1), F(t_n \rightarrow 2), \dots, F(t_n \rightarrow n)$ .

где  $t_{n \rightarrow i} \in t > t_m$  (область  $T_2$ ).

Зная предельно допустимые значения рассматриваемых параметров и функции распределения  $f(t_{np})$ , можно определить остаточный ресурс устройства.

Задача облегчается, если  $F(t)$  - детерминированная функция.

1. Если закон изменения характерного параметра во времени имеет вид [2]

$$F(t) = F(t_0) e^{Ct}$$

где  $F(t_0)$  - параметр, измеренный в начальный момент времени при  $t = 0$ ;

$C$  - постоянная величина, характерная для данной машины.

Как показывает опыт эксплуатации, этому закону соответствуют вибрация агрегата, кавитационный износ проточной части, температура подпятника и др.

Из выражения (1)

$$C = \frac{\ln \frac{F(t)}{F(t_0)}}{t}$$

где  $t$  - время изменения параметра  $F(t)$ .

После проработки агрегатом времени  $t + t_{ocm}$ , когда параметр достигнет предельно допустимого значения  $F(t + t_{ocm})$

$$F(t + t_{ocm}) = F(t_{np}) = F(t_0) e^{C(t + t_{ocm})}$$

откуда

$$C = \frac{\ln \frac{F(t_{np})}{F(t_0)}}{t + t_{ocm}}$$

или

$$t + t_{ocm} = \frac{\ln \frac{F(t_{np})}{F(t_0)}}{C}$$

После преобразований получим

$$t_{ocm} = t \left( \frac{\lg \frac{F(t_{np})}{F(t_0)}}{\lg \frac{F(t)}{F(t_0)}} - 1 \right)$$

2. Если закон изменения характерного параметра

$$F(t) = a t^n + b$$

Подобный закон характерен при изменении объемного КПД отдельных узлов насосов.

При  $t = 0$  параметр  $F(t_0) = b$ .

Параметр  $F(t)$  при предельном времени  $t_{np} = t + t_{ocm}$  примет значение

$$F(t_{np}) = F(t + t_{ocm}) = a (t + t_{ocm})^n + b$$

Разность значений параметра в моменты времени  $t$  и  $(t + t_{ocm})$

$$F(t) - b = at^n \quad \text{и} \quad F(t_{np}) - b = a (t + t_{ocm})^n$$

Прологарифмировав эти выражения и исключив коэффициент  $a$ , получим

$$\lg[F(t) - b] - \lg[F(t_{np}) - b] = n \lg t - n \lg(t + t_{ocm})$$

откуда

$$t_{ocm} = t \left( \sqrt[n]{\frac{F(t_{np}) - b}{F(t) - b}} - 1 \right)$$

Для диагностирования также используют статистические методы распознавания - метод Байеса, метод последовательного анализа, предложенный Вальдом [3] и другие.

Решение общей задачи диагностики складывается из поэтапного решения нескольких задач более низкого уровня (рис. 1).

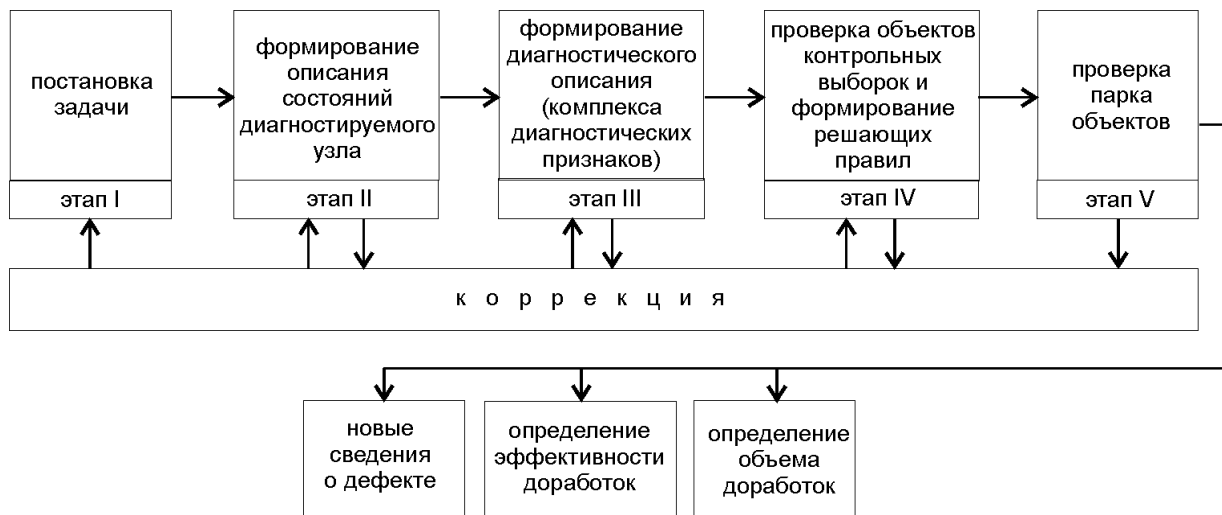


Рис. 1. Структурная схема решения задач диагностики

Для обоснования выбора диагностических параметров в каждом конкретном случае необходимы экспериментальные исследования объектов в рабочем и неисправном состояниях. При этом следует учитывать следующие два обстоятельства: дефекты

обычно характеризуются комплексом диагностических параметров; частоты колебаний вращающихся деталей машин могут не совпадать с частотами колебаний корпусных деталей, являющихся сигналами, несущими диагностическую информацию.

Комплексным диагностическим сигналом, представляющим собой совокупность аддитивных и мультипликативных комбинаций сложных, слабых и сильных «элементарных» диагностических сигналов, возбуждаемых различными источниками колебаний, являются вибрации машин, рассматриваемые при диагностических исследованиях в широком диапазоне частот и амплитуд. При этом частотный состав большинства «элементарных» сигналов может значительно изменяться даже на установившихся режимах работы машины.

Для контроля и управления насосами возможно использование комплексных систем, широко применяемых для решения задач автоматики и телемеханики во многих странах мира (производства Grundfos Electronics, UMA Engineering, PEP, Siemens и др.).

Комплексная система контроля и управления обеспечивает:

- оперативное управление и контроль выбранного объекта в режиме реального времени;
- съем, фиксацию и передачу параметров любых объектов в заданное время или в оперативном режиме;
- гибкое программирование автоматического режима работы объектов, в том числе оптимизация работы скважин;
- программирование режимов работы любого насоса, в зависимости от условий установки, из диспетчерской.

Диагностирование насосных агрегатов в процессе эксплуатации производят по следующим основным и вспомогательным параметрам:

- КПД, определяемому в предположительной зависимости подачи  $Q$  от перепада давления  $h$  на расходомере по формуле  $Q = k h^n$ ,  $n < 1$ ;
- амплитуде пульсации давлений в магистральных трубопроводах;
- сопротивлениям на участках гидролиний;
- уровню шума и вибрациям узлов агрегата;
- эрозионным и другим износам рабочих и корпусных деталей;
- мощности агрегата и ее колебаниям;
- температуре рабочих узлов.

При этом принятые параметры должны наиболее полно отвечать техническому состоянию агрегата, реагировать на неисправности узлов и позволять выявлять эти неисправности, по возможности, без разборки и остановок машины, т. е. «на ходу».

Ремонтируемые объекты, к числу которых относится большинство насосных агрегатов, характеризуются наличием трех основных технологических процессов; изготовлением, эксплуатацией, восстановлением. В первом и последнем процессах формулируются начальные состояния основных узлов и сопряжении, которые в совокупности определяют технический ресурс насосных агрегатов. Их характеристики, непосредственно определяющие работоспособность агрегата, принято называть структурными параметрами технического состояния. Во время эксплуатации, под влиянием большого числа внешних воздействий, которые определяют характеристики режима работы насосных агрегатов и свойства откачиваемой жидкости, значения структурных параметров изменяются от номинальных до предельных величин, обуславливающих наступление функционального или параметрического отказа.

С целью повышения надежности насосных агрегатов на протяжении ряда последних лет нами выполнялись исследования на предприятиях, занимающихся их изготовлением, ремонтом и эксплуатацией.

Объектами данных исследований были насосные агрегаты различных типов (центробежные, осевые) и размеров (крупные, малые), широко применяемые в различных отраслях народного хозяйства (в агропромышленном комплексе, горнорудной и нефтяной промышленности, коммунальном хозяйстве и др.).

Исследования включали обследование отказавших агрегатов, а также новых и отремонтированных перед их установкой или монтажом; изучение указанных технологических процессов путем анализа экспертных оценок специалистов и данных наблюдений за подконтрольными выборками насосных агрегатов; стендовые и натурные эксперименты с имитацией различных значений их структурных параметров и внешних воздействий.

Полученные данные по безотказности представлены в табл. 1.

**Таблица 1**

**Характеристики безотказности погружных насосов мелиоративных скважин**

Марка насоса	Наработка на отказ	Статистические оценки наработки на отказ		
		$\bar{x}$	$G_{n-1}$	V
ЭЦВ 12-255-30	340, 680, 940, 1340, 1620, 1780, 1940, 2420, 2580, 3170, 3830, 4320, 4610, 4990, 5110, 5420, 6180, 6510, 6960, 7200	3597	2206	0,61
ЭЦВ 10-120-60	380, 540, 720, 1180, 1510, 2240, 2760, 3000, 3450, 3920, 4170, 4310, 4830, 5240, 5810, 6120, 6350, 6840, 7100, 7420	3895	2302	0,59

Как следует из данных таблицы, минимальная наработка на отказ на подконтрольных скважинах превышала 300 часов. Поэтому в качестве наименьшего времени до первого диагностирования рекомендуется принять 300 часов работы насосного агрегата.

Анализ данных стендовых и натуральных исследований погружных насосных агрегатов марок ЭЦВ 10-120-60 и ЭЦВ 12-255-30 Г [4] позволил сделать следующие выводы:

Основными структурными параметрами технического состояния погружных насосов типа ЭЦВ являются зазоры в передних уплотнениях рабочих колес и износ подпятника.

Допустимые и предельные значения указанных структурных параметров зависят от режимов функционирования насосного агрегата.

Применительно к условиям эксплуатации скважинных насосов на установках вертикального дренажа Центральной Азии такие структурные параметры, как зазоры в радиальных подшипниках насосной и силовой частей агрегата, а также задних уплотнениях рабочих колес не оказывают существенного влияния на работоспособность электронасоса, вследствие чего в процессе диагностирования их можно не учитывать.

В качестве основных диагностических параметров технического состояния погружных насосов целесообразно применение амплитудно-частотных характеристик



виброскорости соединительного колена обсадной колонны и корпуса электродвигателя насосного агрегата. При этом величина зазоров в передних уплотнениях рабочих колес характеризуется амплитудами высокочастотной области спектра, а значение износа подпятника - низкочастотной.

Применение в качестве диагностического параметра частоты вращения ротора электронасоса нежелательно, ввиду того, что ее колебания от перемены частоты тока в сети, превышают значения, обусловленные изменением технического состояния насосного агрегата.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карасев В.А., Ройтман А.Б. Доводка эксплуатируемых машин. Вибродиагностические методы. - М.: Машиностроение, 1986. - 192 с.
2. Владиславлев Л.А. Надежность гидротурбин. - М.: Энергия, 1970.
3. Биргер И.А. Техническая диагностика. - М.: Машиностроение, 1978. - 240 с. - (Надежность и качество).
4. Гловацкий О.Я. Рекомендации по диагностированию машинных оросительных каналов в агропромышленном комплексе. - Ташкент, 1989. - 28 с.

*Беглов И.Ф.*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОСЕВЫХ НАСОСОВ

Низконапорные электрифицированные установки, оборудованные осевыми жестколопастными насосами, широко используются в Республике Узбекистан, Туркменистане, Республике Таджикистан. В процессе эксплуатации возникает необходимость их регулирования, т. е. приведения в соответствие подачи насоса с требованием потребителя. Наиболее эффективно это можно сделать способом "перепуск с подкруткой" - созданием момента скорости потока перед рабочим колесом энергией отводимой из напорного трубопровода жидкости.

Оценить энергетическую эффективность данного способа регулирования подачи можно следующим образом. Представим поток перед рабочим колесом насоса в виде цилиндра, состоящего из вещества в твердом агрегатном состоянии (рис. 1).

Диаметр этого цилиндра принят равным внутреннему диаметру всасывающего трубопровода  $D_{вс}$ , а длина - численно средней скорости течения воды в сечении перед устройством для закручивания потока:

$$L_u = \frac{4Q_{вс}}{\pi D_{вс}^2} \quad (1)$$

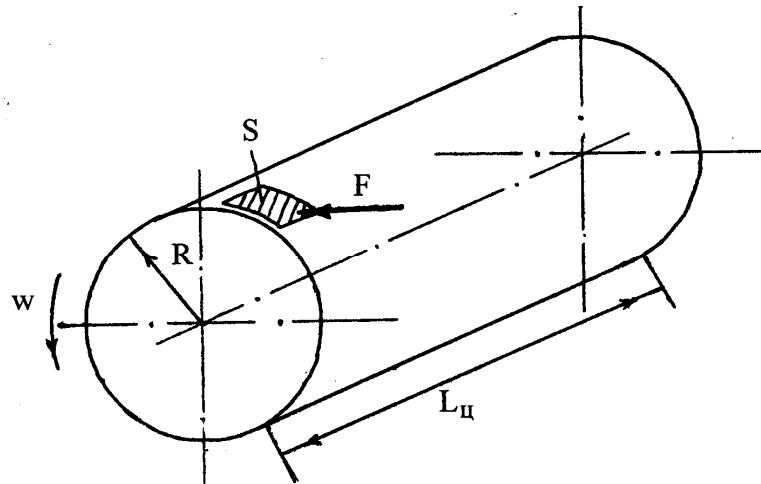


Рис. 1. Описание потока во всасывающем трубопроводе насоса

Момент инерции этого цилиндра равен [1]

$$M_i = \frac{1}{2} m R^2, \quad (2)$$

где

$m$  - масса цилиндра, кг;

$R$  - его радиус, м.

При воздействии на периферийную часть этого цилиндра силой  $F$  цилиндр приобретает вращение. Силу  $F$  можно представить в виде

$$F = \Delta p S, \quad (3)$$

где

$\Delta p$  - перепад давления в соплах, Па;

$S$  - суммарная площадь выходного сечения сопел устройства для закручивания потока,  $\text{м}^2$ .

Импульс момента сил, действующих на этот цилиндр

$$M_{MC} = \Delta p S R \Delta t. \quad (4)$$

Так как импульс момента сил равен моменту количества движения (силами трения пренебрегаем), с учетом  $R = 0,5 D_{\text{вс}}$ , можно записать

$$\frac{1}{2} D_{\text{вс}} \Delta p S \Delta t = \frac{1}{8} m D_{\text{вс}}^2 \Delta \omega. \quad (5)$$

Откуда приращение угловой скорости цилиндра при его закручивании:

$$\Delta \omega = \frac{4 \Delta p S \Delta t}{m D_{\text{вс}}}. \quad (6)$$

Выразим  $\Delta \omega$  через параметры насосной установки. Запишем массу цилиндра как

$$\frac{m}{\Delta t} = \frac{\gamma Q_{yc}}{g}, \quad (7)$$

где

$\gamma$  - удельный вес воды, кг /м<sup>2</sup> с<sup>2</sup>;

$g$  - ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>,

$a$  перепад напора в соплах

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = \Delta H$$

и

$$\Delta H = H_{yc} - h_{wn}. \quad (8)$$

После подстановки (7) и (8) в (6) получим

$$\Delta \omega = \frac{4gS(H_{yc} - h_{wn})}{D_{bc}Q_{yc}}, \quad (9)$$

где

$H_{yc}$  - напор насосной установки, м;

$Q_{yc}$  - подача насосной установки, м<sup>3</sup>/с;

$h_{wn}$  - потери напора в устройстве для закручивания потока и перепускном трубопроводе, м.

С учетом

$$\Delta \omega = \frac{\pi n}{30}$$

получим

$$n_{выч} = \frac{120g S (H_{yc} - h_{wn})}{\pi D_{bc}Q_{yc}}, \quad (10)$$

где

$n_{выч}$  - частота вращения цилиндра, мин<sup>-1</sup>.

Таким образом, замерив перепад давления в соплах устройства для закручивания потока, по формуле (10) можно вычислить частоту вращения  $n_{выч}$  цилиндра.

Частота вращения реального потока жидкости измерялась косвенным способом при помощи гидродинамического флюгера [2] и рассчитывалась по формуле

$$n_{изм} = \frac{60 (Q_{yc} + Q_{п})}{\pi^2 D_{bc}^3} \operatorname{tg} \alpha \quad (11)$$

где

$Q_{п}$  - перепускаемый расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;

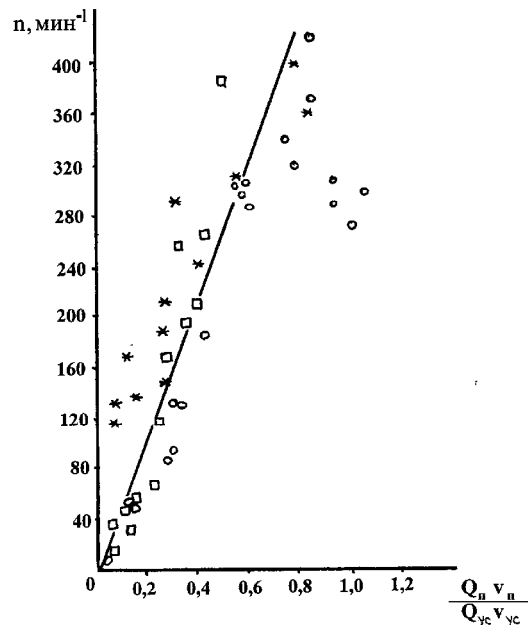
$\alpha$  - угол между направлением скорости закрученного потока и осью всасывающего трубопровода.

Измерив фактическую частоту вращения реального потока жидкости  $n_{изм}$  и сравнив ее с вычисленной  $n_{выч}$ , получим коэффициент преобразования энергии перепускаемой жидкости во вращательное движение потока, подходящего к рабочему колесу, своего рода “КПД” рассматриваемого способа регулирования.

На рис. 2 представлена зависимость частоты вращения от отношения величин

количества движения взаимодействующих потоков, вычисленная по формуле (10), с нанесенными экспериментальными значениями.

Экспериментальные исследования были проведены на насосе ОГ 8-25 при частоте вращения рабочего колеса  $n = 980$  и  $1450 \text{ мин}^{-1}$ . Исследовалось устройство регулирования подачи с диаметром перепускного трубопровода 140 мм. Исследования проводились по методике, изложенной в [2].



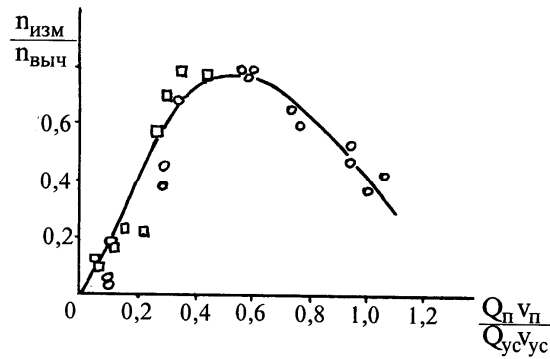
**Рис. 2. Зависимость частоты вращения реального и идеального потоков жидкости перед рабочим колесом насоса от отношения количества движения перепускаемого и транзитного потоков**

\* - расчет;  $o$  - эксперимент,  $n = 980 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\square$  - эксперимент,  $n = 1450 \text{ мин}^{-1}$

Взаимодействие струй, идущих в разных направлениях (перепускаемые струи направлены тангенциально основному потоку), будет зависеть от угла встречи этих струй и скорости движения их относительно друг друга. Чем меньше разница в скорости движения встретившихся под углом потоков, тем меньше будут потери энергии при изменении направления движения совместного потока.

Зависимость, иллюстрирующая эффективность передачи энергии от перепускаемого потока основному, подходящему к рабочему колесу, от отношения количества движения перепускаемого и основного потоков, приведена на рис. 3.

Предположение о том, что эффективность передачи энергии зависит от частоты вращения рабочего колеса, не оправдалось. Из полученной зависимости видно, что все точки легли в пределах одной кривой.



**Рис. 3. Эффективность передачи энергии перепускаемой жидкости потоку перед рабочим колесом**

о - эксперимент,  $n = 980 \text{ мин}^{-1}$ ; □ - эксперимент,  $n = 1450 \text{ мин}^{-1}$

Эффективность передачи энергии возрастает с увеличением величины перепускаемого расхода, достигая максимума в диапазоне отношения количества движения взаимодействующих потоков 0,5...0,6. Уменьшение эффективности справа от максимума объясняется большими потерями энергии перепускаемого потока, обладающего высокими скоростями, главным образом на турбулентное перемешивание.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. Т. 1. Физические основы механики. Молекулярная физика. Колебания и волны. 10-е изд., стереотип. - М.: Физматгиз, 1962. - 468 с.
2. Беглов И.Ф. Исследование закрутки потока перед рабочим колесом осевого насоса // Проблемы механики (Ташкент). - 1996. - № 4. - С. 34-37.

*Хорст М.Г.*

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОРОСИТЕЛЬНОЙ ВОДЫ НА УРОВНЕ ПОЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММЫ CROPWAT

### ВВЕДЕНИЕ

Компьютерная программа CROPWAT [1] разработана Отделением земельных и водных ресурсов (AGLW) Комиссии по сельскому хозяйству и продовольствию Организации Объединенных Наций (FAO). Эта программа предназначена для вычисления водопотребления сельхозкультур и потребностей в оросительной воде на основе известных климатических данных и характеристик сельхозкультур. В основном програм-

ма базируется на методологии, описанной в сборнике FAO № 24 "Водопотребление сельхозкультур" [2]. Программа позволяет рассчитывать не только эвапотранспирацию эталонной и заданной пользователем сельхозкультур, но и составлять графики полива при различных, выбираемых пользователем условиях управления, а также рассчитывать графики водоподачи в орошаемый контур в зависимости от структуры посевов. Сравнительная простота диалога пользователя с программой, делает ее привлекательной при проигрывании сценариев и поиске вариантов эффективного водопользования. Это обстоятельство способствовало распространению этой программы в орошаемом земледелии многих стран мира. Безусловно, ряд допущений, сделанных автором программы М. Смитом для удобства работы с программой не дает возможности учитывать ряд дополнительных параметров необходимых для полностью корректного описания процессов водопотребления сельхозкультур в разнообразных почвенно-мелиоративных и хозяйственных условиях орошаемого земледелия. Тем не менее, в сравнении с известными более точными, но и более сложными программами CROPWAT имеет важное преимущество - доступность для использования и быстрого «проигрывания» множества вариантов специалистами так называемого среднего звена управления сельским и водным хозяйством. Это обстоятельство особо важно в связи с развитием в Центральной Азии новой структуры управления водным хозяйством - Ассоциаций водопользователей и возникающей необходимостью оснащения специалистов этих Ассоциаций относительно простым «инструментом» для расчетов водопотребления, графиков полива и различных оценок эффективности водопотребления.

С 1996 года НИЦ МКВК (Э.Д. Чолпанкулов, О.П. Инченкова), САНИИРИ (Т. Юлдашев) и подпроектом WUFMAS ведется адаптация CROPWAT к специфическим условиям орошаемых земель Центральной Азии.

## КРИТЕРИИ И МЕТОДЫ

В 1997 году программа CROPWAT использовалась нами в подпроекте WUFMAS [3] при сопоставлениях с требованиями сельхозкультур на орошение и оценках фактических объемов водоподачи на орошаемые поля при известных климатических условиях года, характеристиках почв и режиме грунтовых вод.

В каждом хозяйстве WUFMAS-97 из контрольных полей, представленных хлопчатником (всего в 1997 году наблюдалось 95 полей с хлопчатником) было выбрано по одному типичному (по оросительной норме вегетации, типу почв, уровням грунтовых вод, срокам сева и уборки урожая) для данного хозяйства полю. Для демонстрации результатов выполненных с применением CROPWAT оценок далее приводятся данные по пяти полям пяти хозяйств WUFMAS, местоположение которых показано в табл. 1. Исходная информация необходимая для расчетов по программе CROPWAT систематизировалась в виде табл. 2. Необходимые для расчетов метеоэлементы принимались по данным ближайших к рассматриваемым хозяйствам метеостанциям.

## ОЦЕНКА УЧАСТИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД В ВОДОПОТРЕБЛЕНИИ СЕЛЬХОЗКУЛЬТУР В ФОРМАТАХ CROPWAT

Так как в программе CROPWAT (версия 7.0) отсутствует блок учета капиллярной подпитки корнеобитаемой зоны с поверхности грунтовых вод, нами использовался искусственный прием – «вклад» грунтовых вод вводился в виде дополнения к эффективным осадкам.

Известно, что физика процесса капиллярного подпитывания корнеобитаемой зоны сельхозкультур весьма сложна и требует постановки специальных исследований и

определения ряда параметров, необходимых для корректного описания режима капиллярного подпитывания. В наших расчетах вклад грунтовых вод в увлажнение корнеобитаемой зоны оценивался приближенно с использованием модифицированной нами формулы (1)<sup>\*</sup> на основе зависимости, предложенной С.И. Харченко [4] по данным исследований проведенных в регионе и оценок, выполненных Н.Т. Лактаевым [5] для почвенно-мелиоративных условий региона Центральной Азии.

$$G_e = a \cdot ET_0 / e^{b \cdot (H-h)} \quad (1)$$

где

$G_e$  интенсивность подпитывания грунтовыми водами корнеобитаемой зоны, мм/мес, (мм/сутки);

$ET_0$  эвапотранспирация эталонной сельхозкультуры, мм/мес, (мм/сутки);

$e$  основание натурального логарифма

$a; b$  параметры, зависящие от капиллярных свойств почвогрунтов (по табл. 3)

$H$  глубина залегания грунтовых вод от поверхности, м;

$h$  глубина корнеобитаемой зоны, м

---

<sup>\*</sup> Следует отметить, что формула (1) дает удовлетворительные результаты в диапазоне (H-h) до 0,5 м.

Таблица 1

Местоположение хозяйств WJFMAS (1997), данные по которым используются в статье

Код хоз-ва	Республика	Область	Район	Хозяйство	Почвенно-климатическая зона	Гидро-дульный район	Координаты			Высота над уровнем моря [м]	
							Сев.шир	Вос.дол			
09 10	КИРГИЗСТАН	Ошская Ошская	Карасуйский Карасуйский	ЧХК Садыкова КОСХ	Ц-П-В Ц-П-В	III III	40	33	72	49	954
							40	38	72	54	873
17	ТУРКМЕНИСТАН	Марыйская	Байрамалыкский	Д/о Тязе-дурмуш	Ю-П-А	VIII	37	37	62	11	240
23 36	УЗБЕКИСТАН	Сырдарын-ская Бухарская	ШарафРашидов-ский Каганский	Г. Гулям Гулистан	Ц-П-Б Ц-П-А	V V	40	23	68	23	280
							39	45	64	30	230



Таблица 2

Исходные данные (База Данных WUFMAS) к расчетам водопотребления хлопчатника по программе CROPWAT

Хоз-во	Поле	Почва	Гидромо- дульная зона	Доступная влага в почве [мм/м]	Исходная влага в почве [мм/м]	Дата сева	Ста- дия роста	Кс	Длитель- ность ста- дии [сутки]	Глубина корневой зоны [см]	УТВ [см]	Полное созрева- ние	NN по- ливов	Дата по- лива	Междо- ливной период [сутки]	Поливная норма брутто [мм]
9	4	ZL опесча НСН- ный СУПЛИ- НОК	Ц-II-B-III	150	135	16.04.97	A	0.3 5	57	35	>1000		1	01.05.97	15	259
							B		30	>1000			2	13.06.97	43	204
							C	0.9	63	115	>1000		3	09.07.97	26	204
							D	0.7	30	>1000		4	23.07.97	14	201	
												5	07.08.97	15	173	
												13.10.97	5	07.08.97	68	173
10	8	L СУПЛИ- НОК	Ц-II-B-III	160	144	15.04.97	A	0.3 5	51	35	>1000		1	02.05.97	17	194
							B		30	>1000			2	24.05.97	22	184
							C	0.9	63	124	>1000		3	23.06.97	30	189
							D	0.7	30	>1000		4	05.07.97	12	176	
												5	01.08.97	27	146	
												06.10.97	5	01.08.97	67	146
17	5	ZL опесча НСН-	Ю-II-A-VIII	160	144	11.04.97	A	0.3 5	44	35	175		1	06.06.97	56	204

Хоз-во	Поле	Почва	Гидрометрическая зона	Доступная влага в почве [мм/м]	Исходная влага в почве [мм/м]	Дата ссва	Стадия роста	Кс	Длительность стадии [сутки]	Глубина корневой зоны [см]	УГВ [см]	Полное созревание	NN поливов	Дата полива	Межполивной период [сутки]	Поливная норма брутто [мм]
		ненный суглинок					B		25		175		2	03.07.97	27	131
							C	0.9	88	86	170		3	02.08.97	30	139
							D	0.7	30		207	15.10.97	4	23.08.97	21	143
23	7	L	Ц-II-B-V	180	162	20.04.97	A	0.3	46	30	183		1	05.05.97	15	157
		суглинок					B		25		154		2	27.06.97	53	170
							C	0.9	63	74	270		3	07.07.97	10	83
							D	0.7	30		285				87	
												01.10.97				
36	8	ZL	Ц-II-A-V	170	153	16.04.97	A	0.3	46	30	220		1	18.06.97	63	156
		опесчаный суглинок					B		25		160		2	17.07.97	29	156
							C	0.9	86	77	166		3	10.08.97	24	139
							D	0.7	30		170				72	
												20.10.97				

Таблица 3

Параметры «а» и «b» к формуле 1

Механический состав почвогрунтов		а	b
Международная классификация (по треугольнику Ферре)	Классификация Н.А.Качинского		
S	супесь	1.42	1.50
SL	легкий суглинок <sup>*)</sup>	1.19	1.23
L; ZL; SCL	средний суглинок	1.03	1.17
CL; ZCL; SC	тяжелый суглинок	0.94	1.15
C; ZC	глина	0.80	1.16

В случае напорных грунтовых вод интенсивность подпитывания ими корнеобитаемой зоны независимо от типа почвогрунтов определяется в соответствие с предложением Н.Т. Лактаева [5] по формуле:

$$G_e = ET_o * K \quad (2)$$

где K - доля участия грунтовых вод в подпитывании корнеобитаемой зоны по табл. 4.

Таблица 4

Параметр «К» к формуле 2

(H-h), м	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
K	0,9	0,66	0,39	0,19	0,09	0,04	0,03

Наиболее соответствующей местным условиям формулой, из используемых в CROPWAT для расчета эффективной доли атмосферных осадков является формула Бюро мелиорации (США) [1].

$$P_{eff} = (P_{per} * (125 - 0.2 * P_{per}))/125 \quad \text{при } P_{mon} \leq 250 \text{ мм} \quad (3)$$

где  $P_{eff}$  - эффективная часть атмосферных осадков, мм  
 $P_{per}$  - фактическая сумма выпавших атмосферных осадков за рассматриваемый период, мм

Относительно  $P_{per}$  формулу (3) можно записать в следующем виде:

$$P_{per} = (125 - 5*(625-4*P_{eff})^{0.5})/0.4 \quad \text{при } P_{mon} \leq 250 \text{ мм} \quad (4)$$

<sup>\*)</sup> Выделены зоны предпочтительного использования приведенных параметров формулы (1)

С учетом формулы (4) предлагается следующее пошаговое выполнение операций по введению подпитки из грунтовых вод:

На первом шаге определяется эффективная часть зафиксированных атмосферных осадков (автоматическая операция в форматах CROPWAT);

На втором шаге рассчитывается по модифицированной нами формуле (1) величина подпитки корнеобитаемой зоны из грунтовых вод, в рассматриваемый период;

На третьем шаге определяется сумма  $P_{eff} + Ge$  для рассматриваемого периода, таким образом, учитывается только эффективная часть атмосферных осадков и полностью учитывается капиллярная подпитка из грунтовых вод;

На четвертом шаге в зависимости от суммы  $P_{eff} + Ge$  по формуле (4) определяется «фиктивное» значение  $P_{per(fict)}$ ;

На пятом шаге «фиктивное» значение  $P_{per(fict)}$  вводится в исходный формат CROPWAT «Данные по атмосферным осадкам за период».

Таким образом, использование предварительно рассчитанных «фиктивных» значений  $P_{per(fict)}$  позволяет учитывать вклад грунтовых вод в дальнейших расчетах графиков полива.

### Пример:

Исходные данные:			
Сельхозкультура			хлопчатник
Стадия развития			III
Период			июль
Сумма атмосферных осадков за месяц	$P_{mon}$	мм/мес	7,0
Средняя эвапотранспирация эталонной сельхозкультуры	$ETo$	мм/сут	6,0
Средняя глубина корнеобитаемой зоны	$h$	м	0,9
Тип почвы			средние суглинки
Средняя глубина залегания уровня грунтовых вод,	$H$	м	1,9

Результаты расчетов:			
Эффективная доля атмосферных осадков (по ф-ле (3))	$P_{eff}$	мм/мес	6,9
Капиллярная подпитка корнеобитаемой зоны (по ф-ле (1))	$Ge$	мм/сут	1,9
Капиллярная подпитка корнеобитаемой зоны (по ф-ле (1))	$Ge*31$	мм/мес	59,5
Сумма эффективной части атмосферных осадков и капиллярной подпитки	$P_{eff} + Ge$	мм/мес	66,4
«Фиктивное» значение суммы осадков (по ф-ле (4))	$P_{mon(fict)}$	мм/мес	75,6

«Фиктивное» значение  $P_{mon(fict)}$  вводится в исходный формат CROPWAT «Данные по атмосферным осадкам за месяц» для использования в дальнейших расчетах графиков полива.

### ВОДНЫЙ БАЛАНС КОРНЕОБИТАЕМОЙ ЗОНЫ И ОЦЕНКА КПД<sub>поля</sub> В ФОРМАТАХ CROPWAT

Помимо стандартного набора вычислений выполняемых программой интерес представляют возможные практические применения ее и, в частности, при оценках эффективности использования оросительной воды на уровне поля.

При расчетах графиков полива с использованием CROPWAT (версия 7.0) эффективность орошения на уровне поля или КПД<sub>поля</sub> задается предварительно в виде по-

стоянного для всей вегетации коэффициента (по умолчанию в программе CROPWAT принимается

КПД<sub>поля</sub> = 70 %). Вместе с тем, известно, что каждый из фактически проводимых поливов характеризуется, как правило, различающимися значениями КПД. С тем, чтобы обеспечить соответствие расчетов наблюдаемому факту возникает необходимость определения КПД каждого полива.

Рассмотрим в этой связи водный баланс корнеобитаемой зоны, записанный в форматах программы CROPWAT.

Фактическое суммарное водопотребление сельхозкультуры с учетом введенной нами подпитки корнеобитаемой зоны из грунтовых вод в выходных форматах программы CROPWAT (версия 7.0) можно определить исходя из следующего балансового уравнения:

$$AWU_{(Cr)} = TNIr_{(Cr)} + P_{eff} + Ge + \Delta W \quad (5)$$

где:  $AWU_{(Cr)}$  - фактическое суммарное водопотребление сельхозкультуры [мм];

$TNIr_{(Cr)}$  - оросительная норма «нетто» [мм];

$P_{eff}$  - эффективные осадки, «задержанные» в корнеобитаемом слое [мм];

$Ge$  - подпитка корнеобитаемого слоя из грунтовых вод [мм]<sup>\*</sup>);

$\Delta W$  - запасы почвенной влаги в корнеобитаемом слое, использованные за расчетный период, определяемые по разности исходных и конечных запасов влаги в корнеобитаемом слое [мм]

$$\Delta W = W_b - W_e \quad (6)$$

$W_b$  - исходные запасы почвенной влаги в корнеобитаемом слое [мм];

$W_e$  - конечные запасы почвенной влаги в корнеобитаемом слое [мм].

При расчетах по программе CROPWAT, при измеренном объеме водоподдачи на орошаемое поле (поливная норма «брутто»), задаваясь ориентировочным значением КПД<sub>поля</sub>, определяют поливную норму «нетто» и на этой основе оросительную норму «нетто» вегетационного периода:

$$TNIr_{(Cr)(fict)} = TGrIr_{(Cr)} * \eta_{(tenta)} = \sum GrIr_{(Cr)} * \eta_{(tenta)} \quad (7)$$

где  $TNIr_{(Cr)(fict)}$  - «фиктивное» значение оросительной нормы «нетто», используемое в выходных форматах CROPWAT при постоянном для всей вегетации ориентировочном значении КПД [мм];

$GrIr_{(Cr)}$  - поливная норма «брутто» [мм];

$TGrIr_{(Cr)}$  - оросительная норма «брутто» [мм];

$\eta_{(tenta)}$  - ориентировочное значение КПД<sub>поля</sub>, принимаемое для расчетов в первом приближении (по умолчанию в программе CROPWAT принимается КПД<sub>поля</sub> = 70 %).

Фактическая же оросительная норма «нетто» может быть определена из выходных форматов CROPWAT по формуле (8)

$$TNIr_{(Cr)(ac)} = ( TGrIr_{(Cr)} * \eta_{(tenta)} ) - TLos = TGrIr_{(Cr)} * \eta_{(ac)} \quad (8)$$

где  $TNIr_{(Cr)(ac)}$  - фактическая оросительная норма «нетто» [мм];

$TLos$  - суммарные потери оросительной воды за пределы корнеобитаемого слоя [мм];

$\eta_{(ac)}$  - фактическое значение КПД поля, принимаемое как средневзвешенная величина на основе вычислений по формуле (7)

Из формулы (8) КПД<sub>поля</sub> для отдельного полива определяется как:

$$\eta_{(ac)} = (N\text{Ir}_{(Cr)(fict)} - \text{Los}) / \text{GrIr}_{(Cr)} \quad (9)$$

где  $N\text{Ir}_{(Cr)(fict)}$  - «фиктивная» поливная норма «нетто» [мм];

$\text{Los}$  - потери оросительной воды за пределы корнеобитаемого слоя [мм];

$\text{GrIr}_{(Cr)}$  - поливная норма «брутто» [мм].

Таким образом, модифицированное уравнение баланса с использованием форматов CROPWAT приобретает следующий вид:

$$\text{AWU}_{(Cr)} = ( \text{TGrIr}_{(Cr)} * \eta_{(fict)} ) - \text{TLos} + P_{\text{eff}} + \text{Ge} + \Delta W \quad (10)$$

или с учетом

$$\text{TNIr}_{(Cr)(ac)} = \text{TGrIr}_{(Cr)} * \eta_{(ac)} \quad (11)$$

$$\text{AWU}_{(Cr)} = ( \text{TGrIr}_{(Cr)} * \eta_{(ac)} ) + P_{\text{eff}} + \text{Ge} + \Delta W \quad (12)$$

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНОК ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРОШЕНИЯ

### ОЦЕНКА ФАКТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ПОЛИВОВ

Оценка фактической эффективности вегетационных поливов с использованием изложенного подхода и фактических данных (из табл. 2) для выбранных в качестве примера хозяйств и полей WUFMAS-97 приведена в табл. 5.

Общей закономерностью для всех полей является очень низкий КПД<sub>поля</sub> при первом вегетационном поливе (2-16 %). Связано это в основном с несоответствием больших поливных норм «брутто» (140-176 мм) небольшому расчетному слою увлажнения (0,30-0,35 м). Полив в этот период по очень мелким бороздам (~10 см) на фоне неудовлетворительной планировки обуславливает применение очень маленьких поливных струй и как следствие затягивание длительности полива и чрезмерные нормы добега. К концу вегетации КПД несколько возрастают, т.к. поливные нормы «брутто» начинают в большей степени соответствовать увеличившемуся расчетному слою и в максимуме достигают 60-66 % в хозяйствах, расположенных в зонах малоуклонных и безуклонных орошаемых земель (хозяйства 23; 17; 36) и 40-53 % в хозяйствах, расположенных в зонах больших уклонов. В целом же за вегетационный период средневзвешенное КПД<sub>поля</sub> остается низким (21-40 %).

Для более полной оценки воспользуемся результатами расчетов элементов водного баланса, выполненными с использованием предложенных нами модификаций к CROPWAT (табл. 6).

Таблица 5

**Сопоставительная оценка фактических режимов поливов с рекомендуемыми для потенциального уровня водопотребления хлопчатника на основе программы CROPWAT**

Хоз-во	Поле	ФАКТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ПОЛИВОВ					ОПТИМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ПОЛИВОВ ПО РЕКОМЕНДАЦИЯМ CROPWAT				
		NN поливов	Дата полива	Меж-поливной период [сутки]	Поливная норма брутто [мм]	КПД каждого из поливов [%]	NN поливов	Дата полива	Меж-поливной период [сутки]	Поливная норма брутто [мм]	КПД каждого из поливов [%]
9	4			15					88		70
		1	01.05.97		259	10.4	1	13.07..97	154		
				43					23		
		2	13.06.97		204	9	2	05.08..97	154		
				26					26		
		3	09.07.97		204	30	3	31.08.97	148		
10	8			17					88		70
		1	02.05.97		194	16	1	12.07.97	176		
				22					26		
		2	24.05.97		184	0.9	2	07.08.97	172		
				30					32		
		3	23.06.97		189	25.2	3	08.09.97	177		
17	5			12					29		
		4	05.07.97		176	26.5					
				27							
		5	01.08.97		146	53.3					
				67							
		1	06.06.97		204	8.7	1	19.06.97	140		
23	7			27					17		
		2	03.07.97		131	63.6	2	06.07.97	143		
				30					19		
		3	02.08.97		139	63	3	25.07.97	145		
				21					19		
		4	23.08.97		143	30.3	4	13.08.97	143		
36	8			54					21		
				63					43		
		1	05.05.97		157	1.8	1	06.07.97	160		
				53					24		
		2	27.06.97		170	20.5	2	30.07.97	162		
				10					26		
3	07.07.97		83	60.6	3	25.08.97	159				
		87					38				
		63					70				
1	18.06.97		156	6.6	1	25.06.97	148				

Хоз-во	Поле	ФАКТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ПОЛИВОВ					ОПТИМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ПОЛИВОВ ПО РЕКОМЕНДАЦИЯМ CROPWAT				
		NN поливов	Дата полива	Меж-поливной период [сутки]	Поливная норма брутто [мм]	КПД каждого из поливов [%]	NN поливов	Дата полива	Меж-поливной период [сутки]	Поливная норма брутто [мм]	КПД каждого из поливов [%]
				29					17		
		2	17.07.97		156	49.2	2	12.07.97	157		
		3	10.08.97	24	139	65.6	3	29.07.97	148		
				72			4	16.08.97	156		
							5	06.09.97	150		
									45		

Таблица 6

**Водный баланс корнеобитаемой зоны по CROPWAT**

Хозяйство. Поле	Водопотребление хлопчатника в период вегетации (по CROPWAT)		Фактические показатели					Оптимизированные показатели при КПД=70%											
			Водоподача «брутто» - поле	Элементы водного баланса корнеобитаемой зоны				Водоподача «брутто» - поле	Элементы водного баланса корнеобитаемой зоны										
				Оросительная вода аккумулярованная при поливах	Эффективные осадки	Подпитка из грунтовых вод	Использованные запасы почвенной влаги		Оросительная вода аккумулярованная при поливах	Эффективные осадки	Подпитка из грунтовых вод при УГВ=2.5 м	Использованные запасы почвенной влаги							
													На максимум урожая	Фактическое	GrIr <sub>(Cr)</sub>	Ir <sub>(Cr)</sub>	P <sub>eff</sub>	Ge	Δ W
[мм]	[мм]	[мм]	[мм]	[мм]	[мм]	[мм]	[мм]	[мм]	[мм]	[мм]	[мм]	[мм]	[мм]	[мм]	[мм]	[мм]	[мм]	[мм]	[мм]
09.04	528	493	1042	254	122	0	117	455	319	122	0	87							
10.08	537	531	889	275	126	0	130	525	367	126	0	44							
17.05	854	843	617	242	73	420	108	712	499	73	165	117							
23.02	620	407	410	88	110	184	25	481	337	110	96	77							
36.08	878	762	450	178	82	367	135	759	532	82	164	100							
СРЕД.	683	607	682	207	103	194	103	586	411	103	85	85							

В хозяйствах, расположенных в зонах больших уклонов (хозяйства 09;10) примерно 50 % процентов водопотребления покрывается вегетационными поливами и по 25 % приходится на осадки и используемые запасы почвенной влаги. Нормы «брутто» почти вдвое превышают норму водопотребления. Большие потери на поверхностный сброс за пределы орошаемого поля и несколько меньшие на глубинную инфильтрацию за пределы корнеобитаемой зоны.



В хозяйствах, расположенных в зонах безуклонных орошаемых земель (хозяйства 17; 36) основной статьей «покрытия» водопотребления хлопчатника является капиллярная подпитка из близко расположенных грунтовых вод (средневзвешенный УГВ за вегетацию - 1,7 м). При чем формируются они как за счет повышенной глубинной инфильтрации на самих полях при распространенных здесь поливах по так называемым встречным бороздам, так и за счет потерь из необлицованной оросительной сети и притока со смежных орошаемых полей.

В хозяйстве, расположенном в зоне малых уклонов (хозяйство 23) основной статьей «покрытия» водопотребления хлопчатника также, хотя и в несколько меньшей степени является капиллярная подпитка из грунтовых вод (средневзвешенный УГВ за вегетацию – 2,2 м). Низкое КПД<sub>поля</sub> на фоне совершенных оросительной сети (железобетонные лотки) и дренажа (закрытый горизонтальный дренаж) обусловлено в основном крайней рассогласованностью хода водопотребления хлопчатника и фактического графика проведения поливов.

### ВАРИАНТ ОПТИМАЛЬНОГО ГРАФИКА ПОЛИВА

Какой оптимальный сценарий для графиков орошения можно рекомендовать (при известных метеорологических факторах 1997 года и водно-физических свойствах почв) для рассматриваемых хозяйств и какие предварительные условия необходимо при этом обеспечить?

За основной вариант примем вариант, при котором дата и норма очередного полива назначаются при исчерпании в корнеобитаемой зоне запасов легко доступной влаги (60-65 % запасов доступной почвенной влаги).

Так как нормально работающий дренаж в зонах малых уклонов и безуклонных орошаемых земель должен для предотвращения процессов засоления обеспечить залегание уровня грунтовых вод (УГВ) не ближе 2,5 м от поверхности поля, примем это в качестве условия для всей вегетации. В свою очередь это и предпосевное глубокое рыхление позволит увеличить глубину корневой зоны до 1 м.

Для зон больших уклонов как следует из обзора фактических графиков полива необходимо прежде всего обеспечить повышение КПД<sub>поля</sub> до вполне реального в этих условиях значения КПД<sub>поля</sub>=70 %. Достичь это можно применяя схемы так называемого ярусного полива. Так, по одной из таких схем, орошаемое поле разбивается выводными бороздами на 3-4 яруса. По центру поливных делянок трассируются «шох»-арьки. Полив по коротким 60-70 м бороздам начинается с первого яруса, на следующем ярусе заправляются оголовки борозд. После добегаания поливных струй до выводной борозды второго яруса образующийся сброс направляется в выводную борозду и дополняет расход, забираемый из «шох»-арька. В такой последовательности проводится полив на последующих ярусах. Ярусный полив, позволяет добиться равномерного увлажнения поливной делянки и существенно сократить поверхностный сброс, т.к. за пределы поля сброс будет производиться только с борозд последнего яруса.

Для зон безуклонных орошаемых земель обеспечить повышение КПД<sub>поля</sub> можно, применяя схему полива по встречным бороздам, но необходимо, чтобы глубина борозд была не менее 20-25 см, т. е. чтобы борозда имела необходимую аккумулялирующую емкость для размещения объемов воды, не впитавшихся на момент прекращения водоподачи. При соблюдении этого условия возможно применение больших поливных струй ( $q = 0,7-1,5$  л/с) и сокращение длительности полива, что позволит создать равномерный фон увлажнения. Сев хлопчатника желательно производить по заранее подготовленным гребням, это позволит обеспечить равномерные всходы и в последующем применять глубокие борозды.

Для зон малых уклонов обеспечить повышение КПД<sub>поля</sub> можно, применяя схему полива по коротким (100-150 м) тупиковым бороздам, аналогично предыдущему необходимо, чтобы глубина борозд была не менее 20-25 см.

Применяя перечисленные условия в качестве исходных и допуская, что исходная почвенная влага на дату сева сформированная осадками и влагозарядковым поливом составляет 90 % от легко доступной влаги, по программе CROPWAT рассчитаны оптимальные графики поливов для максимального в данных условиях уровня урожая (табл. 5).

Первые вегетационные поливы начинаются в фазу цветения и далее проводятся с межполивными интервалами 23-32 суток в зоне больших уклонов и 17-26 суток в зоне малых уклонов и безуклонных орошаемых земель, это позволит стимулировать максимальное развитие корня вглубь на первых стадиях роста.

В зоне больших уклонов (хоз-ва 09; 10) количество вегетационных поливов сокращается до трех, а поливные нормы «брутто» не превышают 155-177 мм.

В зоне безуклонных орошаемых земель (хоз-ва 17; 36) количество вегетационных поливов увеличивается до пяти, а поливные нормы «брутто» не превышают 140-165 мм. Однородность оптимизированных для каждого из хозяйств поливных норм существенно упрощает управление водоподачей и повышает маневренность управления.

Соотношение между элементами «покрытия» водопотребления хлопчатника (табл. 6) претерпевают изменение в сторону увеличения полезно используемой влаги аккумулированной при поливах от 1.3 раза (хоз-ва 09; 10) до 3.8 раз (хоз-во 23) и сокращения в 2-2,5 раза капиллярной подпитки из грунтовых вод (хоз-ва 17; 23; 36).

#### ОЦЕНКА «ДЕФИЦИТ-ИЗЛИШЕК» ВОДОПОДАЧИ

Сопоставление балансов корнеобитаемой зоны при фактических показателях, зафиксированных на полях WUFMAS в 1997 и оптимизированных приведено в табл. 7. Оценка «дефицит-излишек» водоподачи на максимальный уровень урожайности показывает:

Таблица 7

#### Оценка «дефицит-излишек» водоподачи в вегетационный период на орошение хлопчатника

Хозяйство. Поле	Урожайность хлопчатника		Средневзвешенный фактический КПД <sub>поля</sub> [%]	«Дефицит(-) - Излишек(+)» водоподачи при максимальной урожайности	
	Фактическая	Максимум по CROPWAT		При фактическом КПД поля	При КПД поля =70% и УГВ не выше 2,5 м
	[ц/га]	[ц/га]		[мм]	[мм]
09,04	26,5	30	24	-35	587
10,08	24,4	30	31	-6	364
17,05	36,2	37	39	-11	-95
23,02	19,0	30	21	-213	-71
36,08	32,1	36	40	-116	-309
СРЕД,	27,6	33,5	31	-76	95

- при фактических КПД<sub>поля</sub> дефицит водоподачи в вегетационный период изменяется от 6 мм (хоз-во 10) до 213 мм (хоз-во 23);

- при оптимизированных элементах водного баланса и оптимальном КПД<sub>поля</sub> = 70% объем возможной экономии оросительной воды (относительно водоподачи «брутто» зафиксированной в 1997 году) составляет от 364 мм (хоз-во 10) до 587 мм (хоз-во 09). В остальных хозяйствах дефицит водопотребления изменяется от 71 мм (хоз-во 23) до 309 мм (хоз-во 36).

Анализ выполненный WUFMAS по результатам вегетационного периода 1997 года показал, что в большинстве случаев дефицит водопотребления на уровне орошаемых полей провоцируется большими организационными потерями между водовыделом в хозяйство и полем. В среднем по региону эти потери (сверх 26 % потерь обусловленных техническим уровнем оросительной сети) составляют 27 % от водоподачи в контур хозяйств. Таким образом, при четкой организации внутрихозяйственного водопользования в большинстве случаев возможно обеспечить бездефицитное орошение. Достигается это организацией сосредоточенных поливов на землях, подвешенных к участковым оросителям, введением водооборота между участковыми оросителями и внутрихозяйственными каналами и совершенствованием технологических схем полива на фоне улучшенной агротехники.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ РЕКОМЕНДАЦИЙ WUFMAS

В вегетационный период 1999 года на демонстрационных полях (8 полей хлопчатника и одно поле риса), расположенных в 9 хозяйствах региона (табл. 1) началась практическая реализация, разработанных рекомендаций по повышению продуктивности оросительной воды.

Предварительно были выполнены технико-экономические оценки семи различных сценариев и из них выбран сценарий, предусматривающий снижение затрат оросительной воды с одновременным повышением урожайности сельхозкультур за счет улучшенной агротехники. Особое внимание было уделено предпосевной подготовке почвы, а в период вегетации оптимизации элементов техники полива, т.е. оптимизации сочетаний поливных норм, расходов в борозды и длин борозд для данных уклонов и водопроницаемости почв. Кроме того, квалифицированно была поставлена работа по защите растений. Нормы и сроки поливов назначались дифференцированно в зависимости от развития растений и хода изменений метеоэлементов вегетационного периода.

Контролем для каждого такого поля являлось поле, располагавшееся в сходных почвенно-мелиоративных условиях, но где все операции выполнялись по обычной принятой в данном хозяйстве технологии.

Сравнение результатов полученных на демонстрационных и контрольных полях с хлопчатником, приведенное в табл. 8, подтверждает правильность разработанных рекомендаций и самое главное возможность их практического осуществления без существенных капитальных затрат, т. е. в основном за счет повышения эффективности управления факторами сельхозпроизводства.

На семи демонстрационных полях с хлопчатником урожайность возросла в сравнении с контролем в среднем на 86,5 %, при этом затраты воды на единицу сельхозпродукции сократились на 51,7 %, а продуктивность использования единицы оросительной воды в стоимостном выражении возросла более, чем в 2,5 раза.

Таблица 8

**Продуктивность использования оросительной воды при орошении хлопчатника  
(вегетация 1999 – WUFMAS)**

Код хозяйства	Урожайность				Затраты воды на единицу площади		Затраты воды на единицу урожайности			
	Тип поля		Разница	Прирост урожая	Тип поля		Тип поля		Разница	Снижение затрат
	Демонстрационное	Контрольное			Демонстрационное	Контрольное	Демонстрационное	Контрольное		
	(т/га)	(т/га)	(т/га)	(%)	(тыс.м <sup>3</sup> /га)	(тыс.м <sup>3</sup> /га)	(тыс.м <sup>3</sup> /т)	(тыс.м <sup>3</sup> /т)	(тыс.м <sup>3</sup> /т)	(%)
3 Kaz	2.92	1.38	1.54	111.6	3.56	2.99	1.22	2.17	0.95	43.8
9 Kirg	2.48	2.21	0.27	12.2	5.98	6.09	2.41	2.75	0.34	12.4
14 Taj	3.23	1.87	1.36	72.7	19.93	26.15	6.17	13.98	7.81	55.9
18 Tur	3.39	1.07	2.32	216.8	8.05	7.23	2.37	6.76	4.39	64.9
22 Uz	4.41	2.28	2.13	93.4	8.12	13.42	1.84	5.89	4.05	68.7
34 Uz	4.43	2.73	1.70	62.3	3.35	8.03	0.76	2.94	2.18	74.3
35 Uz	4.52	3.32	1.20	36.1	6.57	8.36	1.45	2.52	1.06	42.3
<b>Среднее</b>	<b>3.63</b>	<b>2.12</b>	<b>1.50</b>	<b>86.5</b>	<b>8.40</b>	<b>11.22</b>	<b>2.32</b>	<b>5.29</b>	<b>2.97</b>	<b>51.7</b>

Код хозяйства	Стоимость произведенной		Затраты факторов с/хозпроизводства		Прибыль		Продуктивность воды			
	Тип поля		Тип поля		Тип поля		Тип поля		Разница	Рост (относительно контроля)
	Демонстрационное	Контрольное	Демонстрационное	Контрольное	Демонстрационное	Контрольное	Демонстрационное	Контрольное		
	(\$/га)	(\$/га)	(\$/га)	(\$/га)	(\$/га)	(\$/га)	(\$/тыс.м <sup>3</sup> )	(\$/тыс.м <sup>3</sup> )	(\$/тыс.м <sup>3</sup> )	(%)
3 Kaz	657	306	384	233	273	73	77	24	52	215
9 Kirg	668	586	580	563	88	23	15	4	11	289
14 Taj	1291	756	517	404	774	352	39	13	25	189
18 Tur	654	203	504	579	150	-376	19	-52	71	136
22 Uz	753	385	594	480	159	-95	20	-7	27	377
34 Uz	1495	869	996	671	499	198	149	25	124	503
35 Uz	1036	763	229	180	807	583	123	70	53	76
<b>Среднее</b>	<b>936</b>	<b>553</b>	<b>543</b>	<b>444</b>	<b>393</b>	<b>108</b>	<b>63</b>	<b>11</b>	<b>52</b>	<b>255</b>

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Приведенные примеры практических приложений программы CROPWAT позволяют рекомендовать ее Ассоциациям Водопользователей в качестве возможного «инструмента» для планирования и оценок эффективности орошения.

Дальнейшие шаги по адаптации программы к специфическим условиям региона должны быть направлены на уточнение коэффициентов орошаемых сельхозкультур при различной водообеспеченности и коэффициентов влияния на урожай водного стресса на различных стадиях развития сельхозкультур.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Smith M. CROPWAT. A computer program for irrigation planning and management. FAO irrigation and drainage, paper 46. Rome, 1992.
2. Doorenbos J., Pruitt W.O.. Crop water requirements. FAO irrigation and drainage, paper 24. Rome, 1992.
3. WUFMAS. Исследования водопользования и управления в сельском хозяйстве. Отчет за 1997 сельскохозяйственный год. Tacis, 1999.

4. Харченко С.И.. Гидрология орошаемых земель. Гидрометеиздат, Ленинград, 1975.

5. Джурабеков И.Х., Лактаев Н.Т. Совершенствование оросительных систем и мелиорации земель Узбекистана. Ташкент, «Узбекистан», 1983.

**Адрес редакции:**  
Республика Узбекистан,  
700187, г. Ташкент, Карасу-4, 11,  
НИЦ МКВК

<http://icwc.aral-sea.net>

Компьютерная верстка и дизайн  
***Беглов И.Ф.***

[info@sicicwc.aral-sea.net](mailto:info@sicicwc.aral-sea.net)

---

Подписано в печать  
Тираж 100 экз.

Формат 80x64 1/16  
Печ. л.

---

Отпечатано в НИЦ МКВК, г. Ташкент, Карасу-4, 11