

УДК 628.1.034.2:556.51(282.2)

**А. А. Кувалкин, А. В. Кувалкин, Б. Х. Санжапов, М. В. Середа**

## **ПЛАНИРОВАНИЕ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ В ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ МЕЛИОРАТИВНОЙ СИСТЕМЕ НА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ**

Предложена методика планирования режимов водопользования в территориально распределенной мелиоративной системе (ТРМС) на имитационном моделировании процессов функционирования магистральной сети и внутрихозяйственного водопользования.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** территориально распределенная мелиоративная система, орошение земель, водопользование, магистральные, распределительные каналы, хозяйственные водовыделы, оросительные системы, поливные режимы.

The technique of water consumption regimes planning in the territorially distributed reclamation system (TDRS) on imitating modeling of the functioning processes of the main network and intra-farm water consumption is proposed.

**Key words:** territorially distributed reclamation system, irrigation, water consumption, main line, distribution channels, farm waterway division, irrigation systems, irrigation regime.

Территориально распределенная мелиоративная система (ТРМС) представляет собой сеть мелиоративных каналов, включая магистральную и распределительные сети, хозяйственные водовыделы, различные сооружения для регулирования водоподачи. Функционирование отдельных участков требует согласования режимов водоподачи и водозаборов в головные и распределительные части каналов, в т. ч. в хозяйственные водовыделы, в соответствии с определенными потребностями конечных водопотребителей.

Представим ТРМС в виде следующих структурных элементов, существенных для построения алгоритма имитационного моделирования процессов водоподачи и распределения воды в системе. Структура технической схемы ТРМС представляется с помощью ориентированного графа-дерева (рис. 1). Вершинами такого графа служат расчетные узлы ТРМС, а ребрами — участки каналов, причем длина каждого ребра соответствует длине участка канала.

Каждая вершина одновременно характеризует ребро графа (формально его длина может быть принята в отдельных случаях нулевой). При этом каждая вершина классифицируется и относится к определенному типу вершин: исток (голова) канала определенного порядка, участок канала, водовыдел, гидротехническое сооружение и его тип, насосная станция и т. д. Соответственно для каждого типа вершин задается информация, которая, согласно типу вершины, имеет определенную структуру, включая призначную часть (тип вершины, местоположение в системе вершин согласно заданной системе кодировки) и информационную часть, характеризующую технические характеристики данного объекта, включая линейные размеры, пропускные способности, гидравлические характеристики и пр.

Совокупность данных об отдельных элементах и вершинах графа составляет информационный образ объекта, а множество всех информационных образов различных структурных объектов составляет информационную модель системы с учетом ее топологии и наиболее существенных параметров,

необходимых и достаточных для решения данной задачи. Система обозначений и нумерация вершин графа-дерева осуществляется таким образом, чтобы учесть ветвление графа с учетом разного порядка элементов ветвления. Здесь выделяются аналогично с естественными водными объектами основной водоток (магистральный канал), водотоки первого порядка (распределительные каналы), запитываемые из основного, водотоки второго порядка, третьего и т. д. База данных, в которой предусматривается хранение систематизированных сведений обо всех элементах системы, включает матрицу смежности ребер и вершин графа системы, на основе которых программным путем при компьютерных расчетах осуществляется «сборка» системы, а также словари и справочники для атрибутивной характеристики расчетных элементов и формирования выходных таблиц и графиков в соответствии с выполняемыми расчетами.

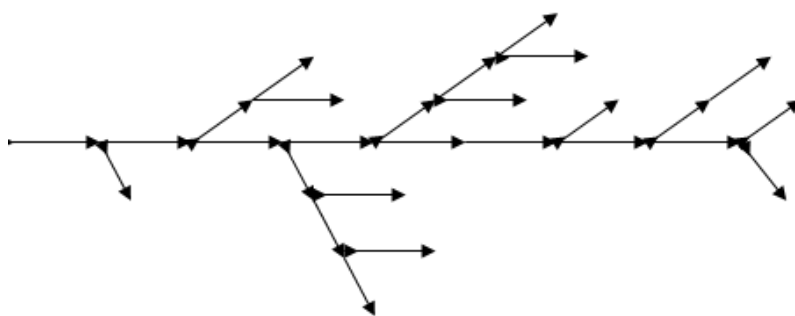


Рис. 1. Схематическое представление графа-дерева сети мелиоративных каналов с системой расчетных вершин

Методика планирования водопользования ТРМС базируется на имитационном моделировании процессов функционирования ТРМС и включает два комплекса моделей — планирования внутриводного водопользования и водораспределения на оросительных системах.

Процесс составления плана начинается снизу для каждого водовыдела. Рассмотрим некоторый хозяйственный водовыдел с номером  $j$ , из каналов которого орошаются  $B_j$  севооборотных участков. Тогда количество поливных участков на  $j$ -ом водовыделе рассчитывается по формуле

$$N_j = \sum_{i=1}^{B_j} n_{ij}, \quad (1)$$

где  $n_{ij}$  — количество поливных участков в  $i$ -м севообороте (на каждом участке возделывается одна сельскохозяйственная культура).

В соответствии с планом посева и полива из каналов этого водовыдела орошаются некоторые  $L_j$  сельскохозяйственные культуры (как правило,  $L_j \leq N_j$ ). Каждая культура в справочнике сельскохозяйственных культур имеет собственный код. В целом по водовыделу формируется вектор  $A_j = \{a_{ij}\}_{i=1, N_j}$ .

Для различия повторяющихся кодов сельскохозяйственных культур в плане полива во взаимно-однозначное соответствие этому набору ставится набор кодов полей этих культур  $C_j = \{c_{ij}\} i = \overline{1, N_j}$ , где  $c_{ij}$  характеризует собой признак принадлежности культуры с кодом  $a_{ij}$  некоторому севообороту на  $j$ -м водовыделе.

Выбор поливных режимов каждой сельскохозяйственной культуры орошаемого севооборотного участка должен отвечать следующим требованиям:

учитывать биологические особенности растений;

соответствовать возможностям и особенностям применяемой техники и способов полива;

повышать плодородие орошаемых земель, не допуская эрозии, заболачивания и засоления почвы.

Для учета и формализации этих требований к поливным режимам сельскохозяйственных культур в плане посева и полива для  $j$ -го хозяйственного участка ставятся во взаимно-однозначное соответствие следующие массивы:

$K_j$  характеризующий мелиоративное состояние орошаемых земель на каждом поливном участке с кодом  $c_{ij}$ ;

$P_j$  характеризующий тип почвы на каждом поливном участке с учетом механического состава корнеобитаемого слоя;

$SP_j$  характеризующий способ полива, которым орошается каждое поле  $c_{ij}$  из каналов  $j$ -го водовыдела.

Каждый поливной участок на водовыделе имеет физическую площадь, следовательно, набору  $A_j$  ставится в соответствие набор

$$S_j = \{S_{ij}\} i = \overline{1, N_j}.$$

В последнее время у нас в стране и за рубежом все большее применение находят расчетные методы определения водопотребления растений, сроков и норм их полива по влажности корнеобитаемого почвы с учетом конкретных почвенно-климатических условий и биологических особенностей культур. Исследованиями, в частности, установлено, что наилучшие условия для развития растений имеют место в том случае, когда в течение определенной части вегетационного периода влажность корнеобитаемого слоя почвы на некотором поливном участке не превышает значения влажности при наименьшей влагоемкости и не опускается ниже некоторой границы оптимума влажности, который обычно составляет не менее 40...60 % от наименьшей влагоемкости. Отсюда следует, что полив сельскохозяйственной культуры назначается в случае, когда влажность корнеобитаемого слоя почвы на поливном участке уменьшается настолько, что становится близкой или равной нижней границе оптимума влажности, при этом величина поливной нормы сельскохозяйственной культуры определяется по уравнению водного баланса для рассматриваемого поливного участка:

$$W_{iht} = W_{iht-1} + O_t + \Pi_{it} - U_{iht} - \Delta W_{iht} + m_{iht}, \quad \forall i = \overline{1, N_j}, \quad (2)$$

где  $W_{iht}$  — расчетное оптимальное значение влагозапасов корнеобитаемого слоя  $h$  на  $i$ -м поливном участке в конце интервала планирования  $t$ ;  $O_t$  — сумма естественных атмосферных осадков, выпавших в районе  $j$ -го хозяйствывыдела в течение интервала  $t$ ;  $\Pi_i$  — подпитывание корнеобитаемого слоя почвы грунтовыми водами на  $i$ -м поле в интервале  $t$ ;  $U_{iht}$  — суммарное водопотребление с/х культуры на  $i$ -м поливном участке в течение интервала  $t$ ;  $\Delta W_{iht}$  — сброс избытка осадков (или поливной воды) за пределы корнеобитаемого слоя почвы  $h_{ij}$  на  $i$ -м поле;  $m_{iht}$  — поливная норма сельскохозяйственной культуры с кодом  $a_{ij}$  на  $i$ -м поливном участке в течение интервала  $t$ .

Использование расчетных методов определения поливных режимов сельскохозяйственных культур по состоянию влажности почвы требует наличия систематических наблюдений за динамикой изменения влажности почвы.

Предположим, что сев каждой с/х культуры на орошаемых землях некоторого  $j$ -го хозяйствывыдела в сроки, приведенные в плане посева и полива, происходит равномерно во времени. Тогда в зависимости от этих сроков и, соответственно, продолжительности сева некоторой культуры с кодом  $a_{ij}$  на  $i$ -м поливном участке предлагается произвести распределение посевной площади  $S_{ij}$  под этой культурой во времени, если продолжительность сева культуры в плане превышает длительность выбранного интервала. Это распределение может привести к сдвигу фенофаз развития растений на этом поле и, следовательно, к различному водопотреблению культуры  $a_{ij}$ :

$$S_{ijm} = \frac{S_{ij} - \sum_{k=1}^{m-1} S_{ijk}}{T_{ij}^{(1)} - \sum_{k=1}^{m-1} t_{kj}}, \quad \forall i = \overline{1, N_j}, \quad (3)$$

где  $T_{ij}^{(1)}$  — продолжительность сева культуры с кодом  $a_{ij}$  на  $j$ -м хозяйствывыделе;  $m$  — порядковый номер интервала сева культуры на  $i$ -м поле, причем  $m = 1, fP_{ij}$ ;  $fP_{ij}$  — количество интервалов посева на  $i$ -м поле;  $t_{kj}$  — продолжительность  $k$ -го интервала посева;  $S_{ijk}$  — физическая площадь с/х культуры с кодом  $a_{ij}$ , засеянная в течение  $k$ -го интервала ее посева.

Кроме того, предусматривается условное распределение посевных площадей с/х культур в том случае, если площадь некоторого поливного участка, приведенная в плане посева и полива культур на водовыделе, не может быть полита в течение некоторого интервала  $t$  вегетационного периода даже минимально допустимой нормой вследствие ограниченных возможностей наличной поливной техники в хозяйстве или пропускной способности водовыдела. Таким образом, с учетом вышеизложенного будем считать, что фактическое количество поливных участков на  $j$ -м водовыделе:

$$NP_j = \sum_{i=1}^{N_j} fP_{ij}. \quad (4)$$

Под поливным участком некоторой с/х культуры будем теперь понимать некоторую площадь участка этой культуры из плана посева на водовыделе, засеянную в течение интервала сева.

В соответствии с планом посева и полива на этом поливном участке возделывается с/х культура с кодом  $a_{ij}$ , поливаемая способом  $SP_{ij}$ . Почва на этом участке имеет тип  $P_{ij}$ , и ее мелиоративное состояние  $K_{ij}$ . Исключение составляет лишь набор кодов полей с/х культур в различных севооборотах  $C_{ij}$ . Для того чтобы в дальнейшем отличать «распределенные» посевные площади культуры с кодом  $a_{ij}$  ( $i = \overline{1, N_j}$ ) на  $i$ -м поливном участке друг от друга, он преобразуется в набор кодов полей с/х культур  $C_j^{(1)} = \{ C_{ij}^1 \}_{i = \overline{1, NP_j}}$ . Здесь однозначно определяется  $i$ -й поливной участок с/х культуры с кодом  $a_{ij}$  в некотором севообороте.

В связи с тем, что на рассматриваемом  $j$ -м водовыделе  $A_j$  в силу ряда объективных причин не могут быть посеяны одновременно несколько культур, т. е. длительность их сева на различных поливных участках может быть различной, вегетация этих культур начинается в разное время. Поэтому для формирования текущего плана водопользования некоторого хозяйства необходимо выбрать некоторую точку отсчета по времени для каждого хозяйственного водовыдела. В качестве этой точки отсчета в модели выбирается либо дата окончания сева (самая ранняя) некоторой сельскохозяйственной культуры  $a_{ij}$  на поливном участке  $C_{ij}^{(1)}$ , либо дата возобновления вегетации некоторой озимой культуры или многолетних насаждений на другом орошаемом поле  $j$ -го водовыдела. А затем, по мере окончания сева или при возобновлении вегетации остальных культур на полях  $C_j^{(1)} / C_{ij}^{(1)}$ , орошаемых из каналов  $j$ -го водовыдела, определяются даты начала (или возобновления) вегетации для этих культур. Для озимых сельскохозяйственных культур и многолетних насаждений при определении дат возобновления их вегетации в модели используются данные справочника сельскохозяйственных культур о средних природно-климатических условиях возобновления вегетации и метеоусловия текущего года, выбранные для формирования годового плана внутриводовыделного водопользования.

После этого преобразования набор кодов сельскохозяйственных культур  $A_j = \{ a_{ij} \}_{i = \overline{1, NP_j}}$  (а соответственно ему и наборы  $C_j^{(1)}$ ,  $P_j$ ,  $SP_j$ ) упорядочиваются в соответствии с датами начала (или возобновления) вегетации, информация о которых находится в массиве  $D_j = \{ d_{ij} \}_{i = \overline{1, NP_j}}$ : на первое место ставится код сельскохозяйственной культуры  $d_{ij}$  на поле  $C_{ij}^{(1)}$ , сев которой закончился (или вегетация которой возобновилась) раньше других и т. д. В результате подобного упорядочения матрица физических площадей под сельскохозяйственными культурами на  $j$ -м водовыделе  $S_j = \{ S_{ijm} \}_{\substack{i = \overline{1, N_j} \\ m = \overline{1, P_{ij}}}}$

преобразуется в массив  $S_j^{(1)} = \{S_{ij}^{(1)}\}_{i=1, \overline{P_j}}$ . Выполненные преобразования помогут в дальнейшем однозначно определить, на каких полях сельскохозяйственные культуры нуждаются в поливе в течение некоторого интервала  $t$  вегетационного периода.

При решении задач планирования водопользования и водораспределения необходимо учитывать фазу, в которой в каждый конкретный момент времени находится сельскохозяйственная культура. В связи с этим возникает необходимость в фенологическом прогнозе каждой сельскохозяйственной культуры. Метод фенологического прогноза основан на корреляционной зависимости длительности фаз развития от температуры воздуха.

В результате обработки статистической информации о датах прохождения фаз развития некоторых сельскохозяйственных культур в различные годы наблюдений получают кривые регрессии, зависимости длительности фаз от суммы среднесуточных температур воздуха  $d_{nij\alpha} = \varphi(\sigma_{ij\alpha})$ , где  $i = \overline{1, NP_j}$ . Кривые регрессии ищутся в виде полиномов.

Прогноз длительности фаз производится следующим образом:

для некоторой сельскохозяйственной культуры  $a_{ij}$  на поле  $C_{ij}^{(1)}$ , орошаемом из некоторого канала  $j$ -го хозяйственного выдела, определяется минимальная длительность фазы  $\alpha$  (исходя из статистики наблюдений за этой сельскохозяйственной культурой);

определяется сумма среднесуточных температур воздуха за этот период  $\sigma_{ij\alpha}^\circ$  при условии, что дата окончания предыдущей фазы известна;

по кривой регрессии находится длительность этой фазы, соответствующая найденной сумме температур,  $-dn_{ij\alpha}^\circ = \varphi(\sigma_{ij\alpha}^\circ)$ ;

находится сумма среднесуточных температур воздуха за период  $dn_{ij\alpha}^\circ$ , и вновь по кривой регрессии для этой сельскохозяйственной культуры определяется длительность фазы  $\alpha$ .

Этот процесс продолжается до тех пор, пока абсолютная величина разности длительностей этой фазы, вычисленной на соседних шагах этой итерационной процедуры, не будет больше 3 суток.

В случае отсутствия статистической информации о датах наступления фенофаз развития некоторых культур (или ее недостаточного объема) предусматривается использование среднестатистических дат наступления фаз развития этих культур с последующим их сдвигом в ту или иную сторону в зависимости от даты начала (или возобновления) вегетации соответствующих сельскохозяйственных культур на рассматриваемом  $j$ -м хозяйственном выделе.

Благодаря найденным тем или иным способом предполагаемым длительностям фаз развития сельскохозяйственной культуры  $a_{ij}$  на орошаемом поле  $C_{ij}^{(1)}$  можно определить, в какой фазе (или фазах) своего развития находится эта культура в течение некоторого интервала  $t$  вегетационного периода.

На основании значений выбранной (или полученной) реализации природно-климатических факторов в районе расположения  $j$ -го водовыдела в тече-

ние вегетационного периода для каждого интервала  $t$  определяются составляющие уравнения водного баланса (2)  $i$ -го орошаемого поля  $C_{ij}^{(1)}$ , причем независимо определяемыми составляющими этого уравнения являются суммарное испарение (водопотребление) сельскохозяйственной культуры и подпитывание корнеобитаемого слоя почвы на этом поле грунтовыми водами.

Основными составляющими суммарного испарения являются транспирация растений и испарение с поверхности растений (эвапорация). Интенсивность переноса водяных паров в атмосферу и отвода их от испаряющей поверхности  $i$ -го орошаемого поля зависит от строения и свойств этой поверхности, от соотношения между элементами энергетического баланса в сложной комплексной системе «почва — растение — атмосфера», от характеристик циркуляции приземных слоев воздуха. Структура и состояние испаряющей поверхности определяются биологическими (морфологическими и физиологическими) особенностями каждой сельскохозяйственной культуры  $a_{ij}$  ( $i = \overline{1, N_j}$ ) в соответствующую фазу ее развития, а также строением, физическими свойствами  $P_{ij}$ ,  $K_{ij}$  и увлажнением поверхности и корнеобитаемого слоя почвы  $i$ -орошаемого поля  $C_{ij}^{(1)}$ . Тепловой и водный баланс в рассматриваемой системе зависит от совокупности элементов метеорологического режима.

Ввиду сложности процесса и невозможности измерения и учета всех действующих на его ход и результат факторов на практике используются упрощенные модели определения суммарного испарения, связывающие его величину при помощи эмпирических параметров с основными факторами, наиболее представительными для количественной характеристики всего процесса испарения, а вместе с тем поддающимся измерению и учету.

Несмотря на значительное число методов расчета суммарного испарения, разработанных в настоящее время, все они имеют либо ограниченный район применения, либо не отличаются большой точностью. В естественных условиях на водопотребление влияет большое число трудноучитываемых факторов, часто зависящих один от другого. Большинство разработанных методов расчета суммарного испарения имеет довольно узкую локальность как в пространстве ввиду большой изменчивости почвенного плодородия, так и во времени, главным образом из-за изменяющегося уровня агротехники. Это ведет к тому, что в каждом конкретном случае при использовании для расчета суммарного испарения существующих методов необходимо производить их качественный анализ с целью выбора наиболее подходящего и отвечающего ряду дополнительных необходимых условий метода.

При определении подпитывания расчетного корнеобитаемого слоя почвы  $h_{ij}$  на любом  $i$ -м поливном участке с кодом  $C_{ij}^{(1)}$  наибольшее распространение в практике водно-балансовых расчетов получила формула

$$\Pi_{it} = \frac{E_{it}^0}{\exp(\mu_{it} H_t)}, \text{ для } \forall i = \overline{1, NP_j}, \quad (5)$$

где  $\mu_{it}$  — эмпирический коэффициент, зависящий от вида сельскохозяйственной культуры  $a_{ij}$  и фазы ее развития;  $H_t$  — уровень залегания грунтовых вод в районе  $j$ -го водовыдела;  $E_{it}^0$  — испаряемость с  $i$ -го поля в течение интервала  $t$ , рассчитываемая по формуле Н. Н. Иванова:

$$E_{it}^0 = 0,00074(25 + \text{temp}_t)(100 - R_t). \quad (6)$$

Здесь  $\text{temp}_t$  — средняя температура воздуха в интервале  $t$ ;  $R_t$  — средняя относительная влажность воздуха, %.

Определению поливных режимов сельскохозяйственных культур на орошаемых землях  $j$ -го хозяйственного водовыдела предшествует расчет сезонной динамики изменения запасов влаги в расчетном корнеобитаемом слое почв  $h_{ij}$  каждого  $i$ -го поливного участка  $i = \overline{1, NP_j}$  с целью определения сброса избытка осадков или оросительной воды  $\Delta W_{ijt}$  за пределы этого слоя по уравнению водного баланса (2).

Причем для некоторого интервала

$$\Delta W_{iht} = \begin{cases} W_{iht} - W_{iht}^{HB} & , \text{ если } W_{iht} - W_{iht}^{HB} > 0, \\ 0 & \end{cases} \quad (7)$$

в противном случае,

где  $W_{iht}^{HB}$  — влагозапасы в расчетном корнеобитаемом слое почва на  $i$ -м поливном участке при наименьшей влагоемкости почвы типа  $P_{ij}$  в слое  $h_{ij}$ .

Из уравнения (2) в соответствии с заданными в справочнике сельскохозяйственных культур оптимальными значениями верхней и нижней границ влагозапасов почвы в соответствующем расчетном слое и для каждой фазы развития этих культур определяются потребности сельскохозяйственных культур на полях  $j$ -го водовыдела в проведении поливов в течение интервала  $t$ . Для этого рассчитываются значения влагозапасов расчетного слоя почвы на каждом  $i$ -м поливном участке, которые могут сложиться на конец  $t$ -го интервала планирования:

$$W_{iht} = W_{iht-1} + O_t + \Pi_{it} - U_{iht} - \Delta W_{iht}, \text{ для } \forall i = \overline{1, NP_j}, \quad (8)$$

где  $W_{iht-1} / t = t_0 = W_{i0}$  — исходные влагозапасы расчетного слоя почвы  $h_{ij}$  на  $i$ -м поливном участке, сформированные в соответствии с данными или входного документа, или справочника влагозапасов почвы.

Необходимо отметить, что значение верхней границы оптимальных влагозапасов почвы  $W_{iht}$  для сельскохозяйственной культуры, выращиваемой на  $i$ -ом поливном участке, в течение вегетационного периода совпадает со значением запасов влаги в выбранном расчетном слое почвы  $h_{ij}$  при наименьшей влагоемкости. Значение же нижней границы оптимальных влагозапасов  $W_{iht}$ , являющейся, вообще говоря, величиной переменной, зависит от фазы развития сельскохозяйственной культуры с кодом  $a_{ij}$  в интервале  $t$ , типа

почвы с учетом ее механического состава в расчетном слое  $P_{ij}$  и мелиоративного состояния земель на  $i$ -м поливном участке  $K_{ij}$  и равно  $\lambda_{it} \overline{W_{iht}}$ , где  $\lambda_{it}$  — эмпирический коэффициент, принимающий обычно значения 0,6...0,8.

Полученное (8) расчетное значение влагозапасов почвы  $i$ -м поливном участке сравнивается со значением нижней границы оптимальных влагозапасов в слое  $h_{ij}$  для интервала  $t$ . Если для некоторого поливного участка выполняется неравенство  $\overline{W_{iht}} \leq W_{iht}$ , то в течение интервала  $t$  на этом поливном участке должен быть проведен вегетационный полив сельскохозяйственной культуры с кодом  $a_{ij}$  нормой

$$m_{iht} = \overline{W_{iht}} = W_{iht}. \quad (9)$$

В противном случае, если  $\overline{W_{iht}} \geq W_{iht}$ , осуществляется проверка следующего,  $(t+1)$ -го, интервала планирования на возможность достижения влагозапасами расчетного слоя почвы на  $i$ -м поливном участке критической границы влажности завядания  $W_{ih}^{зав}$ , при которой для растений могут наступить необратимые процессы (они не восстанавливают тургор даже после длительного пребывания в атмосфере, насыщенной водяными парами). Для этого поливного участка находится расчетное значение

$$W_{ih,t+1} = W_{iht} + O_{t+1} + \Pi_{t,t+1} - U_{ih,t+1} - \Delta W_{ih,t+1}, \quad \varphi_i = \overline{1, N_j}. \quad (10)$$

Если для  $i$ -го поливного участка в этом случае выполняется условие  $W_{ih,t+1} \leq W_{ih}^{зав}$ , то для сельскохозяйственной культуры  $a_{ij}$  на этом участке в течение интервала  $t$  должен быть проведен полив нормой, рассчитанной по выражению (9). Если же наоборот,  $W_{ih,t+1} > W_{ih}^{зав}$ , то  $m_{iht} = 0$ , и полив сельскохозяйственной культуры с кодом  $a_{ij}$  в материале  $t$  вегетационного периода не планируется.

Необходимо отметить, что если в течение интервала  $t$  в соответствии со справочником сроков проведения агротехнических мероприятий на  $i$ -м поливном участке сельскохозяйственной культуры с кодом  $a_{ij}$  должны быть проведены сопутствующие работы согласно агротехнике возделывания этой культуры и в то же время на этом участке планируется проведение полива нормой  $m_{iht}$ , то полив культуры в плане переносится на  $(t+1)$ -й интервал, если только влагозапасы расчетного слоя почвы на рассматриваемом участке не достигнут критической границы влажности завядания. В противном случае полив сельскохозяйственной культуры  $a_{ij}$  планируется провести в течение интервала  $t$ , а проведение соответствующих агротехнических мероприятий переносится, например, на  $(t+1)$ -й интервал вегетационного периода.

Как известно, помимо вегетационных поливов, в создании оптимальных по влажности условий произрастания сельскохозяйственных культур и формировании их урожая важная роль отводится проведению предпосевных,

предпосадочных и влагозарядковых поливов. Поэтому для формирования оптимального плана водопользования предусмотрено определение сроков и норм этих поливов.

Так, для определения норм в сроков предпосевных и предпосадочных поливов используется информация о датах начала сева в плане посева сельскохозяйственных культур на орошаемых землях  $j$ -го водовыдела и о средних продолжительностях временных интервалов между поливом и посевом этих культур. Если текущий номер интервала планирования  $t$  совпадает с номером рассчитанного интервала для проведения этого полива на некотором  $i$ -м поливном участке и расчетное значение влагозапасов корнеобитаемого слоя почвы на этом участке под будущей культурой не превышает нижней границы оптимальных влагозапасов, то в течение интервала  $t$  в плане поливов сельскохозяйственных культур предусматривается проведение на  $i$ -м участке предпосевного или предпосадочного полива нормой, рассчитанной по выражению (9). В противном случае полив культуры в интервале  $t$  не планируется.

Влагозарядковые поливы создают основные запасы влаги, которые используются растениями в течение всей вегетации. Поэтому, если на некотором  $i$ -м поливном участке осенью после уборки культуры-предшественника предусмотрен сев озимой культуры или будет продолжаться вегетация многолетних насаждений (информация об этом находится в плане посева и полива для рассматриваемого водовыдела), в случае необходимости на этом участке назначается влагозарядковый полив нормой для промачивания почвы на 1,5...2,5 м. Срок и величина нормы этого полива также определяются на основании динамики изменения влажности почвы по уравнению водного баланса (8), но для большего слоя почвы, соответствующего глубине ее промачивания для озимой сельскохозяйственной культуры (или многолетних насаждений) с кодом  $a_{ij}$ .

Подобная процедура определения потребностей сельскохозяйственных культур на  $j$ -м водовыделе в орошении в интервале  $t$  выполняется для всего набора поливных участков  $C_j^{(1)}$ . В результате этой процедуры определяется подмножество поливных участков  $G_{jt} (G_{jt} < C_j^{(1)})$  культуры, которые требуют проведения полива в течение интервала  $t$  и, следовательно, могут конкурировать между собой при распределении выделяемой хозяйству оросительной воды в условиях ее дефицита.

На основании потребностей сельскохозяйственных культур в оросительной воде на поливных участках из подмножества  $G_{jt}$  определяются объемы водопотребления (нетто) этих культур в интервале  $t$  вегетационного периода:

$$v_{ij} = m_{int} S_{ij}^{(1)}, \text{ для } \forall_i = \overline{1, NK_{jt}}, \quad (11)$$

где  $NK_{jt}$  — количество поливных участков на водовыделе, на которых сельскохозяйственные культуры в течение интервала  $t$  требуют проведения полива ( $NK_{jt} \leq NP_j$ ).

В соответствии с набором кодов способов полива сельскохозяйственных культур на водовыделе  $SP_j$  подмножество кодов поливных участков  $G_{jt}$  распределяется по приемлемому способу полива на два массива:  $G_{jt} = G_{jt}^{(1)} \cup G_{jt}^{(2)}$ , на суммарные потребности сельскохозяйственных культур в воде накладываются интегральные ограничения по возможностям поливальных машин и наличной техники полива.

А. При поливе дождеванием:

1. Определяется объем воды, который могут подать на полив участков сельскохозяйственных культур с кодами  $C_{jt}^{(1)} = \{g_{ij}^{(1)}\}_{i=1, \overline{N_{jt}^{(1)}}}$ , орошаемых дождеванием, имеющиеся в хозяйстве дождевальная машина и агрегаты, закрепленные за полями  $j$ -го водовыдела, в течение интервала  $t$ .

$$V_{jt}^{(1)} = K_m \sum_g P_g N_{gj} t_{dgt} K_{rg}, \quad (12)$$

где  $K_m$  — коэффициент техники полива, который зависит от применяемой техники полива и погодных условий;  $P_g$  — производительность дождевальной машины типа  $g$ , м<sup>3</sup>/ч;  $N_{gj}$  — количество дождевальных машин типа  $g$ , закрепленных за поливными участками  $j$ -го водовыдела;  $t_{dgt}$  — время работы дождевальной машины  $g$  в течение интервала  $t$ , ч;  $K_{rg}$  — коэффициент использования рабочего времени дождевальной машины типа  $g$ .

2. Определяется суммарный объем водопотребления (нетто), который необходимо подать в  $j$ -й водовыдел для орошения сельскохозяйственных культур на поливных участках с кодами  $C_{jt}^{(1)}$  в течение интервала  $t$ :

$$v_{jt} = \min(V_{jt}^{(1)}); \sum_{C_{ij}^{(1)} \in G_{jt}} v_{ij}. \quad (13)$$

В случае неудовлетворения потребностей сельскохозяйственных культур на полях с кодами  $G_{jt}^{(1)}$  в подаче воды вследствие ограниченности возможностей наличного парка поливной техники, закрепленной за этими полями, неизбежно занижение уровня водоснабжения растений путем сокращения потребных поливных норм или перенесение сроков поливов отдельных культур в сравнении с оптимальными.

В основу распределения воды между культурами в каждый конкретный момент времени при формировании текущего плана внутриводовыделного водопользования в модели положен принцип, заключающийся в выделении так называемых групп приоритетности культур орошаемого хозяйства на основе их влаголюбивости в различные фазы развития и значимости этих культур как для хозяйства, так и для всего региона в целом. Для сведения к минимуму ошибок, связанных с принятием решений о поливе нуждающихся сельскохозяйственных культур в интервале  $t$  в соответствии с выделенными группами приоритетности, формируется вектор очередности полива сельскохозяйственных культур на  $j$ -м водовыделе. При этом учитывается динамика потребностей в проведении поливов на каждом участке и возможных отказов в подаче воды на эти участки в силу каких-либо объективных причин.

Следовательно, если в некотором интервале вегетационного периода происходит снижение водопотребления сельскохозяйственных культур на полях  $G_{jt}^{(1)}$  в связи с ограниченными техническими возможностями имеющихся дождевальными машин и агрегатов, в модели осуществляется пересчет оптимальных объемов водопотребления (соответственно и поливных норм, и влагозапасов расчетного слоя почвы) этих культур в соответствии с полученным вектором очередности полива сельскохозяйственных культур на водовыделе в интервале  $t$ . Для этого массив кодов поливных участков  $G_{jt}^{(1)}$  упорядочивается согласно этому вектору очередности, и осуществляется следующий пересчет:

$$\begin{aligned} &\text{если } \sum_{\substack{i=1 \\ C_{ij}^{(1)} \in G_{jt}^{(1)}}}^{N_{jt}-1} v_{ij} \leq V_{jt}^{(1)}, \text{ а } \sum_{\substack{i=1 \\ C_{ij}^{(1)} \in G_{jt}^{(1)}}}^{N_{jt}^*} v_{ij} \leq V_{jt}^{(1)}, \\ &\text{то } \tilde{v}_{ij} = v_{ij}, \text{ для } \forall i = \overline{1, N_{jt}^* - 1}, \quad N_{jt}^* \leq N_{jt}^{(1)}, \\ &\tilde{v}_{ij} = V_{jt}^{(1)} - \sum_{\substack{i=1 \\ C_{ij}^{(1)} \in G_{jt}^{(1)}}}^{N_{jt}^*-1} v_{ij}, \text{ для } i = N_{jt}^*, \\ &\tilde{v}_{ij} = 0, \text{ для } \forall i = \overline{1, N_{jt}^* + 1, N_{jt}^{(1)}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Б. При поливе поверхностными способами:

1. Определяется объем воды, который могут подать на полив участков сельскохозяйственных культур с кодами  $G_{jt}^{(2)} = \{g_{ij}^{(1)}\} i = \overline{1, N_{jt}^2}$ , орошаемых в интервале  $t$  поверхностными способами, имеющиеся в хозяйстве поливальщики:

$$V_{jt}^{(2)} = K_m P_n N_{nj} t P_{jt}, \quad (15)$$

где  $P_n$  — производительность поливальщика, м<sup>3</sup>/ч;  $N_{nj}$  — количество поливальщиков, закрепленных за поливными участками  $j$ -го водовыдела;  $tP_{jt}$  — время работы поливальщика в течение интервала  $t$ , ч.

2. Определяется суммарный объем воды (нетто), который необходимо подать в  $j$ -й водовыдел для орошения сельскохозяйственных культур на поливных участках с кодами  $G_{jt}^{(2)}$  в течение интервала  $t$ :

$$v_{jt}^{(2)} = \min \left( V_{jt}^{(2)}; \sum_{C_{ij}^{(1)} \in G_{jt}^{(2)}} v_{ijt} \right). \quad (16)$$

В случае неудовлетворения в течение интервала  $t$  потребностей сельскохозяйственных культур, поливаемых поверхностными способами, осуществляется пересчет объемов водоподачи (соответственно и поливных норм, и влагозапасов расчетного слоя почвы) на поливные участки этих культур

с кодами  $G_{jt}^{(2)}$ . Для этого массив кодов участков  $G_{jt}^{(2)}$  также упорядочивается в соответствии с полученным вектором очередности полива сельскохозяйственных культур в интервале  $t$  и производятся расчеты водопотребления культур по выражениям, аналогичным (14).

В результате подобных преобразований получается скорректированный по возможностям поливальщиков и имеющейся дождевальной техники вектор очередности полива сельскохозяйственных культур на орошаемых землях  $j$ -го водовыдела в интервале  $t$ .

В соответствии с этим вектором очередности полива и учетом подачи воды на технические нужды хозяйства  $VTN_{jt}$  суммарный объем воды, подаваемый в  $j$ -й водовыдел в течение интервала  $t$ , можно найти как

$$\bar{v}_{jts} = \sum_{i=1}^S itj + VTN_{jt}. \quad (17)$$

где  $S = \overline{1, NK_{jt}^*}$ , причем  $NK_{jt}^* \leq NK_{jt}$ .

При составлении графика забора воды в некоторый  $j$ -й хозяйственный водовыдел необходимо производить учет ее потерь из оросительной сети, которые складываются из фильтрационных потерь и технологических сбросов. Нормативные проектные материалы рекомендуют для расчетов формулу Н. Н. Павловского, согласно которой фильтрационные потери воды на единицу длины  $j$ -го хозяйственного распределителя подсчитываются по формуле

$$QP_{jt} = 0,0116K_{\phi}h_{oj}\left(B_j + 2v\sqrt{1+m_j^2}\right), \quad (18)$$

где  $K_{\phi}$  — коэффициент фильтрации, зависящий от типа почвы на орошаемых участках водовыдела;  $v$  — поправка на боковое капиллярное поглощение воды в откосах канала;  $b_j$ ,  $h_{oj}$ ,  $m_j$  — гидравлические параметры  $j$ -го водовыдела (соответственно ширина по дну, нормальная глубина, заложение откосов канала).

$$B_j = b_j / h_{oj}.$$

Вторая составляющая потерь воды в оросительной сети — технологические сбросы. Объем потерь воды во внутриводовыделной оросительной сети, «подвешенной» к  $j$ -му водовыделу, находится как

$$V_{jts}^n = LR_j QP_{jt} T_t \frac{\lambda_j SF_{jts}}{L_{cp}}, \quad (19)$$

где  $LR_j$  — протяженность  $j$ -го распределителя (КМ);  $\lambda_j$  — удельная протяженность каналов внутриводовыделной оросительной сети на единицу орошаемой площади;  $SF_{jts}$  — площадь, на которой функционирует оросительная сеть в течение интервала  $t$ ;  $L_{cp}$  — средняя длина каналов внутриводовыделной сети;  $T_t$  — длительность интервала  $t$ , с.

Следовательно, объем воды, который требуется подать в  $j$ -й водовыдел в течение интервала  $t$  вегетационного периода, определится как

$$\bar{u}_{jts} = \bar{v}_{jts} + V_{jEs}^{\text{пор}}, \text{ для } \forall S = \overline{1, NK_{jt}^*}. \quad (20)$$

Чтобы окончательно получить потребный план водозабора в  $j$ -й хозяйственный водовыдел для интервала  $t$ , необходимо учесть пропускную способность  $j$ -го водовыдела. При рассмотрении бездефицитного случая (в том числе бездефицитного и по осадкам) правильно спроектированная и построенная оросительная сеть должна обеспечить пропуск потребных расходов. В реальных же условиях некоторые из хозяйственных каналов в силу неудовлетворительной эксплуатации могут иметь пропускную способность ниже проектной. Кроме того, подобная ситуация может возникнуть в особо напряженные периоды вегетационного периода, когда пропускной способности некоторого хозяйственного канала (даже при его правильной эксплуатации) не будет хватать для удовлетворения потребностей сельскохозяйственных культур в подаче воды.

Тогда после сравнения объема водоподачи, полученного в (20), с пропускной способностью  $j$ -го водовыдела получим:

$$u_{jt} = \min(\bar{u}_{jts}; Q_j^{nc} T_t), \quad (21)$$

где  $Q_j^{nc}$  — пропускная способность  $j$ -го водовыдела.

В случае выполнения ограничения по пропускной способности этого водовыдела вновь осуществляется перерасчет потребных объемов водоподачи сельскохозяйственных культурам на полях  $G_{jt}$ , орошаемых из каналов  $j$ -го водовыдела в течение интервала  $t$ , в соответствии с вектором очередности полива:

$$\text{если } \bar{u}_{jtr-1} \leq Q_j^{nc} T_t, \text{ а } \bar{u}_{jtr} > Q_j^{nc} T_t, \quad (22)$$

$$\text{то } \tilde{v}_{ij} = \tilde{v}_{ij}, \text{ для } \forall i = \overline{1, r-1}, r \leq NK_{jt},$$

$$\tilde{v}_{ij} = (Q_j^{nc} T_t - \bar{u}_{jtr-1}) \left( 1 - \frac{V_{jtr}^{\text{пор}} - V_{jtr-1}^{\text{пор}}}{\bar{u}_{jtr} - \bar{u}_{jtr-1}} \right) \text{ для } i = r,$$

$$\tilde{v}_{ij} = 0 \text{ для } \forall i = \overline{r+1, NK_{jt}^*}.$$

Потребность в пересчете, аналогичном (22), может возникнуть для рассматриваемого хозяйственного водовыдела, например, при решении задачи планирования водопользования для гидромелиоративной системы (возникновение в некоторый момент  $t$  так называемого «узкого места» на межхозяйственной оросительной сети, то есть такой ситуации, при которой возможности некоторого межхозяйственного канала не могут удовлетворить потребностей некоторой группы хозяйственных водовыделов и для них необходимо решать задачу водораспределения) и задачи планировать водозабор из источника орошения (возникновение в некоторый момент времени  $t$  дефицита водных

ресурсов, отпущенных на орошение, и, следовательно, необходимость решения задачи водораспределения для всей оросительной сети, «подвешенной» к источнику орошения). В обоих этих случаях в рассматриваемый  $j$ -й водовыдел в течение интервала  $t$  выделяется расход воды  $g_{jt} < Q_j^{nc}$ , и, следовательно, для этого расхода в модели осуществляется пересчет потребных объемов водоподачи на орошение сельскохозяйственных культур, соответствующих им поливных норм и расчетных значений влагозапасов активного слоя почвы на каждом поливном участке этого водовыдела.

Описанная методика формирования оптимального текущего плана внутрихозяйственного водопользования является единой для всех орошаемых хозяйств с полевыми севооборотами.

Рассчитанные по описанному выше алгоритму потребности хозяйств-водопользователей необходимо согласовать с возможностями межхозяйственной оросительной сети и гидротехническими сооружениями на ней, а также с соответствующим лимитом водозабора в распределитель.

Анализ возможностей водоподачи на орошение и технические нужды хозяйств ведется в разрезе участков межхозяйственных каналов, расположенных между соседними ГТС. Отметим, что некоторый  $K_j$ -й участок  $j$ -го распределителя содержит  $NK_j$  хозяйственных водовыделов, и множество номеров хозяйственных водовыделов в рассматриваемой оросительной сети составляет

$$N_j = \sum_{K_j=1}^{N1_j} NK_j,$$

где  $N1_j$  — количество участков на  $j$ -м межхозяйственном распределителе.

Пусть  $SV_m$  — суммарный потребный объемы водопотребления с/х культур, орошаемых из  $m$ -го хозяйственного водовыдела. Для определения объемов потерь воды на фильтрацию и испарение по каждому  $K_j$ -му участку межхозяйственной сети используется массив значений КПД участков оросительной сети  $\{rK_j\}_{K_j=1, N1_j}$ . Объем потерь  $PK_j$  по каждому участку найдется как

$$PK_j = (1 - rK_j) \sum_{m \in NK_j} SV_m.$$

Для определения объемов суммарной водоподачи на орошение и технужды хозяйств-водопользователей в точки водовыделов магистрального канала необходимо провести «стяжку» потребностей хозяйств по всем участкам межхозяйственного распределителя.

Анализ возможностей водоподачи ведется по пропускной способности межхозяйственных каналов и производительности работы ГТС. В том случае, если объем водоподачи, который необходимо пропустить через  $K_j$ -й участок  $j$ -го межхозяйственного распределителя, не удовлетворяет техническим возможностям сети, параметрам ГТС или производительности работы насосных станций, то объем водоподачи сокращается до требуемого уровня. Соответственно сокращаются и потребности хозяйств-водопользователей в точки хозяйственных водовыделов на соответствующих участках  $j$ -го распределителя.

В результате подобных преобразований получается план водозабора и суммарного водопотребления на орошение по  $j$ -му межхозяйственному распределителю для каждого конкретного года, выбранного для расчетов режимов функционирования ОС из ретроспективного ряда лет наблюдений за метеофакторами внешней среды.

© Кувалкин А. А., Кувалкин А. В., Санжапов Б. Х., Серeda М. В., 2013

*Поступила в редакцию  
в ноябре 2013 г.*

*Ссылка для цитирования:*

Планирование водопользования в территориально распределенной мелиоративной системе на имитационной модели / А. А. Кувалкин, А. В. Кувалкин, Б. Х. Санжапов, М. В. Серeda // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строит. информатика. 2013. Вып. 10(30). Режим доступа: [www.vestnik.vgasu.ru/attachments/KuvalkinKuvalkinSanzhapovSereda2-2013\\_10\(30\).pdf](http://www.vestnik.vgasu.ru/attachments/KuvalkinKuvalkinSanzhapovSereda2-2013_10(30).pdf)