

ПОКАЗАТЕЛИ И КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ В ИУВР ФЕРГАНА.

1. Введение

По результатам анализа, выполненного во вступительной фазе проекта, для системы ИУВР – Фергана, рекомендована иерархическая структура управления водными и земельными ресурсами, отражающая, как существующие водохозяйственные связи, так и информационные потоки, формируемые в рамках выполняемого проекта. Верхним иерархическим уровнем управления принят уровень управления бассейном Ферганской долины, с включением информационных связей **БВО**. На втором уровне иерархии находятся крупные оросительные системы и отдельные каналы (**КСК**), соподчиненные уровню управления (**БВО**) и обеспечивающие магистральную переброску и распределение водных ресурсов между различными **АВП** и **Фермерскими хозяйствами**. Следующим иерархическим уровнем является Ассоциация водопользователей (**АВП**) и коллективных хозяйств, определенная как самостоятельный водохозяйственный объект, формирующий лимиты водных ресурсов к водозаборам и контролирующей их подачу в разрезе каналов и административных единиц. В качестве нижнего иерархического уровня управления, принят уровень отдельного **Фермерского хозяйства**, где определены, структура посевных площадей и условия засоленности почв, техника орошения и техническое состояние внутриводохозяйственной оросительной и коллекторно-дренажной сети.

Концепция многоуровневой структуры управления водораспределением обеспечивает последовательную реализацию стратегических и тактических целей, распределения водных ресурсов между участниками в годовом, месячном, декадном и суточном разрезе, где каждый нижестоящий уровень преследует, кроме собственных критериев эффективности, стратегию управления, установленную на вышестоящем уровне иерархии.

2 Функционирование ирригационной системы

Цель любой ирригационной системы заключается в транспортировке требуемых объемов воды в заданные точки пространства и времени. Поэтому технология распределения водных ресурсов, на каждом иерархическом уровне, опирается на собственный набор гидротехнических сооружений, объемы водных ресурсов, подаваемые с вышестоящего уровня и требований от нижестоящих объектов. Основными эксплуатационными характеристиками функционирования ирригационной системы, являются:

- ✓ обеспеченность водой орошаемых площадей и водопотребителей,
- ✓ равномерность распределения объемов воды между всеми участниками,
- ✓ равномерность заполнения графиков подачи воды участникам во времени,
- ✓ объемы потерь водных ресурсов в системе,
- ✓ управляемость системой.

Будем рассматривать ирригационную систему как объект управления, для которого каждую из выше перечисленных характеристик, можно трансформировать в собственный (частный) критерий, отражающий определенное смысловое качество функционирования системы. Использование различных критериев будет приводить к разным вариантам распределения водных ресурсов. Следовательно, задача управления ирригационной системой, относится к многокритериальным задачам, где неопределенность цели требует введения дополнительных гипотез о значимости той или иной характеристики и допускающих линейную (или нелинейную) свертку частных критериев. Неопределенность цели не единственный вид неопределенности в управлении ирригационной системой. Стохастическая (непредсказуемая точно) природа гидрологического стока, образующего доступные объемы водных ресурсов, и погодные условия, формирующие конкретные требования водопользователей обуславливают следующий вид неопределенности. Этот вид неопределенности, обычно называемый

«природной неопределенностью» требует поиска некоторой стратегии управления распределением водных ресурсов, как функции от поступающего объема стока и текущих погодных условий, так как он не позволяет заранее определить единственное решение.

Для комплексной оценки функционирования ирригационной системы, по каждому частному критерию, требуется сформулировать набор показателей, адекватно отражающих динамику этого критерия, как в системе в целом, так и в ее отдельных элементах. Таким образом, любой показатель не является самостоятельным элементом, который можно использовать без относительно выбранного критерия. Безусловно, что в сложных технических системах, где происходит пересечение пространств целей, возникают ситуации, когда один показатель может отражать динамику сразу нескольких критериев, но это лишь косвенное отражение, которое ни в коем случае нельзя использовать в прямых расчетах, поскольку различия в условиях нормировки у разных критериев может привести к непредсказуемым результатам. В инженерной практике часто используется, так называемый, набор «контрольных показателей» [1], как способ преодоления неопределенности целей. Этот способ (простейший, но не лучший) возникает, когда на часть показателей накладываются числовые ограничения. Ограничения могут быть двух или односторонними это не так важно, основное упрощение состоит в том, что теперь остается только один критерий, по которому осуществляется оценка функционирования системы, т.е. решение становится однозначным. Основным недостатком этого способа заключается в том, что для подавляющего большинства реальных объектов, он приводит к математически неразрешимым задачам. Физически это будет лишь означать, что часть параметров системы выйдет за допустимые пределы, а математическое состояние системы окажется неопределенным.

Используемые наборы показателей, на каждом иерархическом уровне, могут быть различными, кроме того они могут меняться на разных этапах управления системой, в зависимости от текущей важности того или иного критерия. Обязательного согласования по нормировке требуют лишь те составы показателей, через которые обеспечивается меж иерархическая увязка распределения водных ресурсов. Прежде чем переходить к выбору и обоснованию показателей для разных уровней иерархии и различных этапов управления, следует высказать некоторые общие принципы, на которые следует ориентироваться при их разработке для ирригационных систем:

a) любой набор показателей, вводимый для оценки какой либо из характеристик функционирования ирригационной системы, должен иметь, не менее одного алгоритма, обеспечивающего вычисление интегрального значения показателя по рассматриваемой характеристике, для системы в целом,

b) показатели должны однозначно вычисляться через переменные, характеризующие состояние объектов ирригационной системы,

c) показатели должны масштабироваться по какому либо, наиболее важному параметру ирригационной системы, с тем чтобы была возможность сравнения эксплуатационных характеристик у различных ирригационных систем,

d) значения показателей отдельных элементов ирригационной системы должны отражать реальную долю их нагрузки, в функционировании системы.

Последнее требование связано с тем фактом, что при расчетах показателей на пилотных каналах, для отдельных элементов, периодически возникали значения $\sim 500 \div 1000$. Как показал дальнейший анализ, эти значения не соответствовали тому, что данное гидротехническое сооружение загружено в $500 \div 1000$ раз больше (или меньше) нормативного, а лишь указывали на несостоятельность выбранной шкалы, используемых показателей. Несмотря на тривиальность пунктов “a”, “b” и “d”, большая часть показателей, предложенных в проекте, не удовлетворяет, сформулированным выше, требованиям.

Кроме выделенных требований совершенно особо стоят вопросы, связанные с длительностью интервалов времени, в течение которых числовые значения показателей сохраняет свою ценность, как известно, ценность любой информации падает с течением времени, причем скорость падения этой «ценности» существенно зависит от типа, выбранного показателя.

В математических исследованиях процессов управления на существующих ирригационных системах существует проблема адекватного формального описания физических элементов системы и их взаимного влияния друг на друга, а также проблема корректного описания сложившихся отношений между ее различными участниками. На вновь создаваемых системах эта проблема, как правило, отсутствует. Важность второй проблемы особенно ярко проявляется на этапах калибровки феноменологических коэффициентов математических моделей, поскольку требует четкой формализации существующих правил по распределению водных ресурсов между участниками. К сожалению, эти правила являются наиболее завуалированными элементами ирригационной системы и порождают еще одну разновидность неопределенности. В этих условиях разработчик математической модели сталкивается с неизбежной проблемой выбора между упрощением модели с потерей точности, и наоборот, большей ее детализацией. В первом случае, сознательно допускается определенное искажение физических и технических показателей системы, с тем, что бы при выполнении идентификации параметров, в неявном виде получить одновременно и сложившиеся взаимоотношения между участниками. Подобные модели, достаточно хорошо зарекомендовали себя в управлении технологическими процессами, если условия внешней среды не испытывают сильных скачков. Второй путь опирается на более детальное описание физических процессов и технологии элементов системы, с тем что бы идентификацию параметров выполнить по косвенным оценкам или даже по другим аналогичным системам. Неизвестные отношения в этом случае не участвуют в идентификации параметров и определяются на втором этапе идентификации отношений или правил по распределению водных ресурсов, сложившихся в системе на рассматриваемый момент времени. Несмотря на большую трудоемкость второго пути, результаты полученные на таких моделях не только позволяют управлять системой в более широком диапазоне изменения внешних условий, но дают возможность выявления отдельных социальных закономерностей, имеющих самостоятельную ценность. В обоих случаях для идентификации параметров моделей необходима разработка состава показателей, обеспечивающих калибровку моделей. Эти показатели не имеют отношения к показателям эффективности функционирования системы [2], и в большей мере отражают познавательную сторону исследований, чем технологическую.

3 Основные этапы в управлении водораспределением

В управлении процессом распределения водных ресурсов, как и в любом технологическом процессе, можно выделить отдельные периоды, этапы, задачи, различающиеся временными интервалами и характером информации, используемой для принятия решений. В данной работе не рассматриваются вопросы реконструкции и перспективного планирования ирригационных систем, поэтому за наибольший период управления принимается интервал времени равный одному году (водохозяйственному году), который, состоит из двух периодов, - вегетации и межвегетации. В свою очередь, каждый период разбивается на временные интервалы равные одной декаде и обозначаемые через "t". Для обозначения времени внутри декады используется обозначение "τ", $\tau \in t$. Рассматриваемый интервал времени будем обозначать через "t", а предшествующий и последующий через "t - 1", "t + 1", соответственно. Технические характеристики элементов системы сохраняют свои значения на всем периоде управления. Последнее допущение показывает, что на данном этапе анализа, аварийные ситуации в ирригационных системах не рассматриваются, косвенно они могут учитываться снижением параметров для характеристик "объемы потерь водных ресурсов в системе" и "управляемость системы". Согласно существующей терминологии, годовой период управления водораспределением состоит из следующих этапов, рис 1:

- годового планирования
- оперативного планирования
- оперативного управления

3.1 Годовое планирование

Годовое планирование выполняется для вегетационного и межвегетационного периодов.

Задача 1: - определение объемов водных ресурсов, требуемых участниками,

Состав исходной информации:

- состав сельскохозяйственных культур,
- площади, занятые сельскохозяйственными культурами,
- распределение площадей по гидромодульным районам,
- нормы водопотребления сельскохозяйственных культур,
- нормы промывки площадей орошения,
- среднемноголетние гидрологические характеристики района.

Методы решения:

- прямой счет, оптимизационные постановки практически не используются.

Результаты решения:

- требуемые объемы воды для каждого участника за весь период и в декадном разрезе.

Показатели оценки качества решения:

- удельная продуктивность воды средневзвешенная по территории ($\$/\text{м}^3 \times \text{га}$)
- продуктивность воды в разрезе сельскохозяйственных культур ($\text{м}^3/\text{га}$),

Задача 2: - корректировка объемов водных ресурсов согласно выделенным лимитам.

Состав исходной информации:

- прогноз водности текущего года,
- технические возможности ирригационной системы.

Методы решения:

- распределение ресурсов в сети с ограниченной пропускной способностью, оптимизационная.

Результаты решения:

- выделенные объемы воды для каждого участника на весь период в декадном разрезе.

Показатели оценки качества решения:

- равномерность распределения воды в годовом разрезе,
- равномерность распределения воды в декадном разрезе,
- удельная потери воды в системе (к.п.д.),

Результат решения обеих задач годового планирования:

- скорректированный план водопользования.

Годовое планирование выполняется два раза в год, в межвегетационный период для распределения водных ресурсов на предстоящий вегетационный период, и в вегетационный период для распределения водных ресурсов для межвегетационного периода следующего водохозяйственного года. Последовательность задач для этих этапов приводится на рис 1.

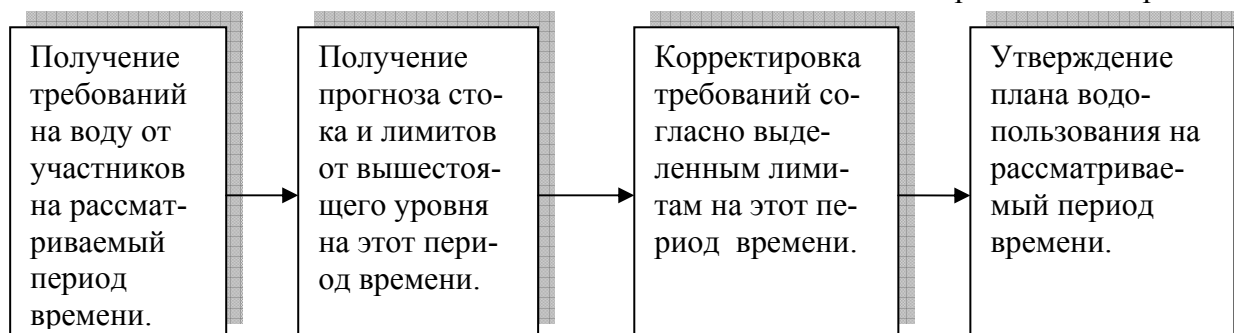


Рис 1, Годовое планирование.

3.2 Оперативное планирование

Оперативное планирование выполняется ежедекадно, “t” – номер декады.

Задача 1: - анализ распределения водных ресурсов за истекший период $\{0 \dots t-1\}$.

Состав исходной информации:

- план водопользования,

- заявки участников, за период времени $\{0 .. t - 1\}$,
- фактическая подача воды участникам за период времени $\{0 .. t - 1\}$,
- фактический гидрограф поступившего стока за период времени $\{0 .. t - 1\}$,

Метод решения:

- распределение ресурсов в сети с ограниченной пропускной способностью, оптимизационная.

Результаты решения:

- показатели отклонений подачи воды между участникам на период времени $t - 1$.

Оценка качества решения:

- обеспеченность участников водой за прошедшие периоды управления,
- равномерность и своевременность распределения воды между участниками,
- объем потерь водных ресурсов в системе.

Задача 2: - корректировка объемов водных ресурсов, подаваемых участникам на момент времени “ $t + 1$ ”,

Состав исходной информации:

- составы показателей за период времени $\{0 .. t - 1\}$ (Результаты *задачи 1*),
- откорректированный план водораспределения для интервала времени “ t ”,
- заявки участников, на момент времени “ $t + 1$ ”, формируются по фактическим датам сева и поливов сельскохозяйственных культур, а также текущим погодным условиям,
- прогноз гидрографа стока на момент времени “ $t + 1$ ”,

Методы решения:

- распределение ресурсов в сети с ограниченной пропускной способностью, оптимизационная.

Результаты решения:

- объемы водных ресурсов, подаваемые участникам на момент времени “ $t + 1$ ” в точном разрезе,

Оценка качества решения:

- близость подаваемого объема к заявленному,
- снижение объем потерь водных ресурсов в системе,
- увеличение равномерности и своевременности водораспределения между участниками.

Последовательность решения задач на этапе **Оперативное планирование**, для интервала времени “ t ”, от получения информации до реализации решения представлена на Рис 2.

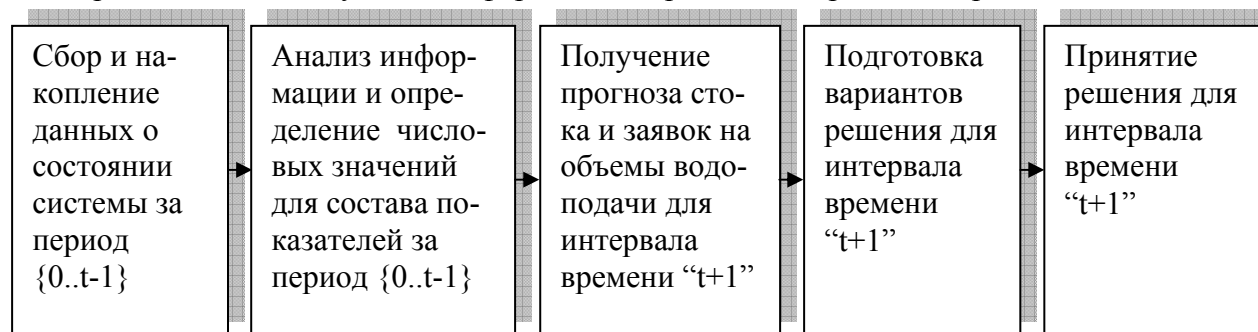


Рис 2, Оперативное планирование.

3.3 Оперативное управление

Оперативное управление выполняется ежедневно, а в случае необходимости ежечасно.

Задача 1: - подача объемов водных ресурсов участникам согласно значениям, установленным на этапе оперативного планирования, для момента времени “ t ”,

Состав исходной информации:

- декадные объемы водных ресурсов по каждому участнику,
- фактический гидрограф поступающего стока в момент времени $\tau \in t$,
- фактическое состояние гидротехнических сооружений.

Методы решения:

- методы регулирования.

Результаты решения:

- суточные (часовые) объемы водных ресурсов, подаваемые участникам,

Оценка качества решения:

- Диапазон в разбросе часовых и суточных расходов, относительно заданного.

Задача 2: - учет подаваемых объемов водных ресурсов.

Состав исходной информации:

- фактические замеры поступающего стока в момент времени " $\tau \in t$ ",
- фактическое состояние водомерных устройств в момент времени " $\tau \in t$ ".

Методы решения:

- методы интерполяции и восстановления информации.

Результаты решения:

- фактические значения расходов воды по каждому участнику,
- фактические значения уровней воды вдоль каналов,

Показатели оценки качества решения:

- диапазон колебаний отдельных значений и погрешности водомерных устройств.

Здесь τ – момент времени внутри декады.

Этап **Оперативное управление**, обеспечивает реализацию решений, выработанных на этапах Годового и Оперативного планирования. Последовательность решения задач этапа **Оперативное управление** приводится на рис. 3.

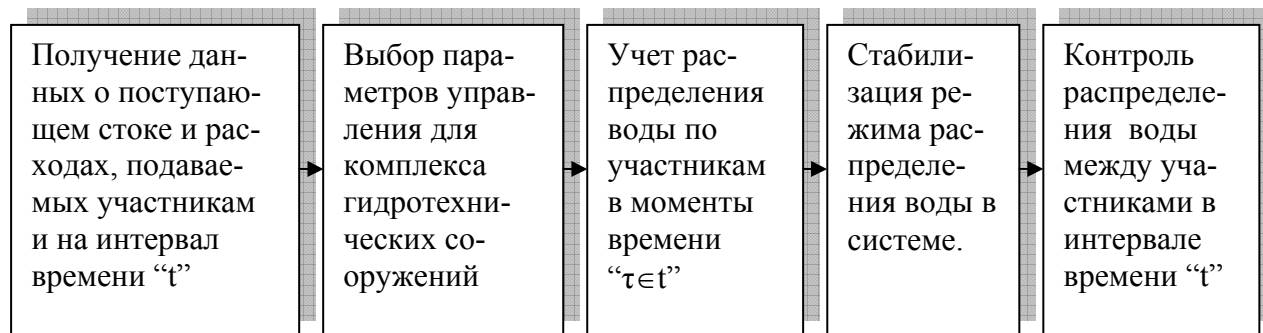


Рис. 3. Оперативное управление

Решение задачи 2, **Оперативное управление**, формирует петлю обратной связи, необходимую для решения задач на этапе **Оперативное планирование**.

4. Анализ процесса управления распределением воды.

4.1 Годовое планирование.

Отдельные задачи, каждого этапа в управлении ирригационной системой имеют различную информационную базу для разных объектов и уровней иерархии. Так, например, информационная основа задачи - «корректировка объемов водных ресурсов согласно выделенным лимитам» в этапе **Годовое планирование**, принципиально различна для тех **КСК**, в голове которых расположены регулирующие емкости, обеспечивающие соответствие между требуемым и подаваемым гидрографами (в данном проекте такими объектами являются ЮФК и Араван Акбуруинский канал), и **КСК**, голова которых опирается на естественный приток (канал Гуля Кондоз). В первом случае, гидрограф стока формируется на бассейновом уровне исходя из возможностей регулирования и гарантий соблюдения лимитов, которые "... на примере Сырдарьи зачастую зависят не столько от гидрологии и степени зарегулирования, сколько от политики и дисциплины бассейнового управления¹...". Во втором слу-

¹ В.А.Духовный, комментарии к данной работе.

чае, не зарегулированного стока, следует также определить величину гарантированных объемов, но уже исходя из вероятностной кривой обеспеченности конкретного водотока. Таким образом, в обоих случаях, план водопользования должен опираться на некоторые гарантированные значения стока, а фактические прогнозы водности рассматриваться в качестве возможных добавок. Естественно, что для объектов с не зарегулированным стоком, резко возрастает роль этапа **Оперативное планирование**. Кроме этого, значимость информации о средне декадных объемах падает по мере снижения уровней иерархии, поскольку чем ближе мы подходим к полю, тем уже становится промежуток времени, в течении которого выполняется подача воды, для отельных водовыделов он (промежуток времени водоподачи) исчисляется сутками. В этих условиях задачи этапов **Оперативное планирование** и **Оперативное управление**, пересекаются, поскольку понятие средне декадного расхода теряет смысл.

Этот небольшой анализ показывает на необходимость разделения состава показателей по уровням иерархии и по условиям питания головного водозабора. Вместе с этим, наиболее важным шагом в данный момент времени, является формирование показателей, которые не теряют смысл при переходе от уровня к уровню и от системы к системе. Кроме этого, не менее важной характеристикой показателя, является длительность интервала времени, в течение которого его числовое значение сохраняет свою ценность, поэтому набор показателей, опирающихся на какую либо интегральную характеристику ирригационной системы, будет иметь преимущество. Для этапа **Годовое планирование**, наиболее очевидны следующие характеристики:

- *обеспеченность водой участников за периоды управления,*
- *удельная водоподача ($m^3/га$),*
- *удельная продуктивность воды ($\$/m^3$),*
- *объем потерь водных ресурсов в системе.*

Таким образом, набор показателей должен состоять из:

- *относительной обеспеченности водой участников за периоды управления,*
- *относительной удельной водоподачи по участникам,*
- *относительной продуктивности воды в системе,*
- *относительного объема потерь водных ресурсов в системе.*

В качестве базовых значений этих показателей используются их гарантированные величины, полученные по многолетним рядам. Для лет, резко отличающихся по водности от средне-многолетних, в набор показателей можно рекомендовать включение дополнительной характеристики “управляемость системой”. Для этого этапа, до конца не решенными, остаются следующие вопросы:

- *Зависят ли правила урезки от водности года ?*,
- *Все ли участники имеют равные приоритеты ?*.

4.2 Оперативное планирование.

Из состава информации этапа **Оперативное планирование**, видно, что для задач корректировки объемов водных ресурсов, подаваемых участникам на момент времени “ $t+1$ ”, используются информационные потоки за разные интервалы времени. Между интервалом времени, для которого выбирается решение и интервалом времени с опорной информацией рис. 3, существует лаг равный одной декаде, поскольку фактическое состояние системы за интервал времени “ t ”, еще неизвестно. Таким образом, основная неопределенность, в настоящий момент времени, на этапе **Оперативное планирование**, содержится в вопросе: **Каким образом, на этапе Оперативное планирование, используются все виды информации, имеющейся в интервале “ t ”, при принятии решения для интервала времени “ $t+1$ ”?** Только корректная алгоритмизация этих правил использования имеющейся информации, позволит однозначно определить критерий (или критерии) водораспределения, на основе которого и будет сформирован необходимый состав показателей. Естественно, что сами правила могут быть различными для лет разной водности, но главное они должны быть известными до начала вегетации, это вторая, не менее важная причина для четкой алгоритмизации этих

правил - их *озвучивание*, с тем что бы, после составления плана водопользования, все участники знали по какому принципу будет осуществляться дальнейшее распределение воды, и соответственно, что именно они (участники) могут предпринять для улучшения своей хозяйственной деятельности. В предложениях наших коллег из IWMI, рекомендуется перенести акценты с *управления планированием* на *управление спросом*. Эти рекомендации имеют смысл лишь для этапа *Оперативное планирование*, поскольку на этапе *Годовое планирование* выполняется именно *управление спросом*, так как требования со стороны участников и есть *спрос на воду*. На этапе же *Оперативное управление*, выполняется только суточная реализация, найденного решения, в условиях реального времени и фактического гидрографа стока, т.е. вопросы корректировки не рассматриваются. На этапе *Оперативное планирование*, вся информация о фактическом *спросе* содержится в *заявке* на объем водных ресурсов, подаваемой участником, в момент времени “t” для интервала времени “t+1”. Рассмотрим возможные варианты развития событий в системе при ее реакции на спрос. Будем полагать, что все участники достаточно квалифицированы, и что они правильно определили даты и нормы полива по всем хозяйствам, с учетом фактического развития сельскохозяйственных культур и прогноза о метеоусловиях, для интервала времени “t + 1”. Подобные *заявки*, безусловно, будут более адекватно отражать объемы водных ресурсов, необходимых конкретному участнику, но лишь при обязательном условии, - полного выполнения *заявок*. В условиях дефицита воды (при неполном выполнении *заявок*) начнется их постепенный рост, т.е. участник, более информированный, будет завышать заявку на величину предполагаемой урезки!, что, в свою очередь, еще больше будет увеличивать дефицит в системе, подобная практика уже имела место в СССР. Но это не единственный недостаток прямой реакции на спрос, как известно, в Ферганской долине, существует высокая корреляция между осадками и поверхностным стоком, следовательно фактический гидрограф стока и фактические заявки участников будут находится в противофазе, а значит резко увеличивается вероятность совпадения максимальных объемов воды, заявляемых участниками, с минимальными значениями стока в системе. Подобная ситуация, уже возникла летом 2003 года на Араван Акбуринском канале, где, несмотря на высокую водность 2003 года, дефицит погасить не удалось, правда по другой причине, по условиям предельной пропускной способности системы². Этот анализ показывает, **что отказ от реакции на плановые значения не только не уменьшит, а скорее наоборот, увеличит глубину дефицита при распределении водных ресурсов.** Следующий небольшой пример, не связан с попытками регулирования глубины дефицита водных ресурсов в системе, он в большей мере отражает *условия справедливости* водораспределения. Рассмотрим двух гипотетических участников, один из которых старается придерживаться плановых значений, выделенных ему объемов воды, путем соответствующей сдвижки сроков сева и дат первого полива, для различных сельскохозяйственных культур, а второй, назовем его “свободный художник”, ориентируется исключительно на погодные условия и требования сельскохозяйственных культур. Будем полагать, что оба участника достаточно квалифицированы, для осуществления этой деятельности и в равной мере участвуют в выполнении плановых показателей, установленных Государством. Что бы не усложнять анализ излишними деталями, примем что, рассматриваемый год имеет среднемноголетние характеристики водности, так что фактические значения объемов стока, примерно соответствуют нормам водопотребления сельскохозяйственных культур. Плановые значения требований от каждого участника и вероятного гидрографа стока, для трех декад вегетационного периода, стока приводятся на рис 5.

² Анализ ситуации с дефицитом на Араван Акбуринском канале в период вегетации 2003 года, выполнен руководителем деятельности №1, Мирзаевым Н.Н.

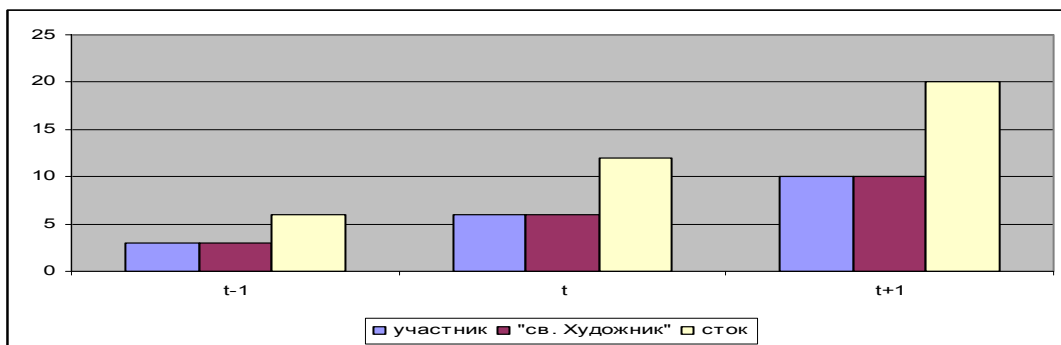


Рис 5. Плановые значения требований участников и гидрографа стока.

На рис 6. Приводятся фактические значения заявок участников и гидрографа стока, причем принято условие, что при наличии водных ресурсов заявки выполняются полностью. Распределение воды в декадах "t-1" и "t", тривиально и пояснений не требует, каждый получал воды столько, сколько просил, избыток стока при этом сбрасывался в реку (специфические условия Ферганской долины, которые могут не выполняться в других областях). В декаде "t+1" наблюдается дефицит, обусловленный исключительно заявкой "св. художника", вопрос – как следует *справедливо* распределить дефицит в системе? Вариант пропорциональной урезки по спросу приводится на рис 7. Как видно из рис. 7, оба участника недополучили воду, причем "св. художник" получил 12.3 условных единицы воды, а первый участник 7.7.

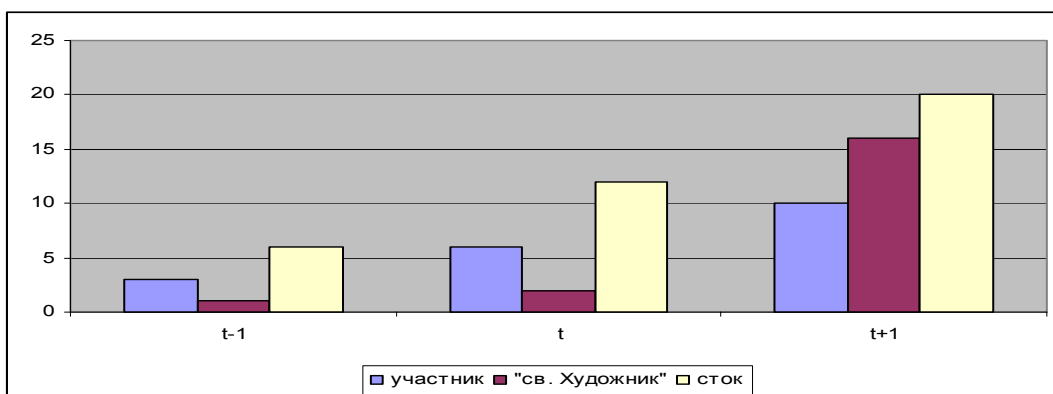


Рис 6. Фактические требования участников и гидрографа стока.

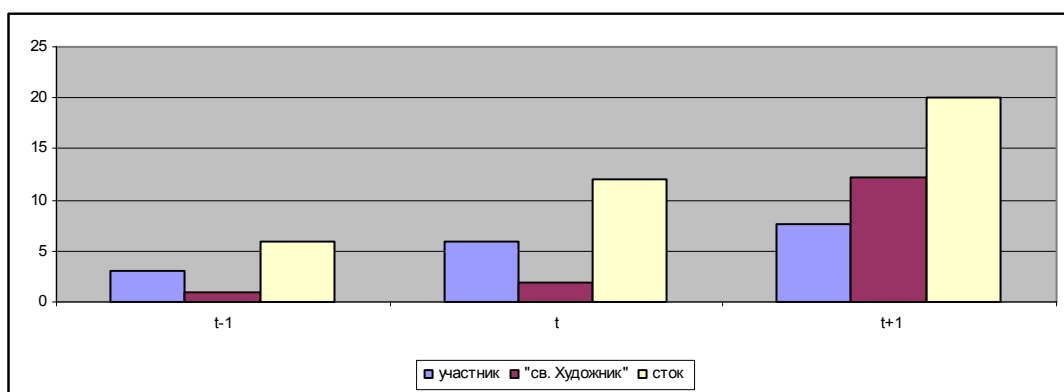


Рис 7. Вариант пропорциональной урезки по спросу.

Если предположить, что первый участник будет придерживаться стратегии "св. художник", то глубина дефицита возрастет в два раза, в первом случае дефицит составлял 6 единиц, а во втором 12. Заявки и распределение дефицита, согласно пропорциональной урезки по спросу, приводится на рисунках 8 и 9.

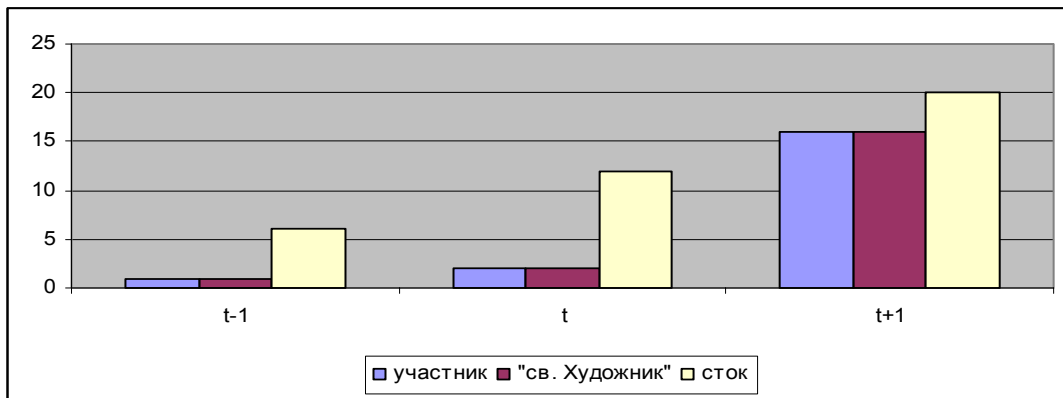


Рис 8, Заявки и сток (второй случай).

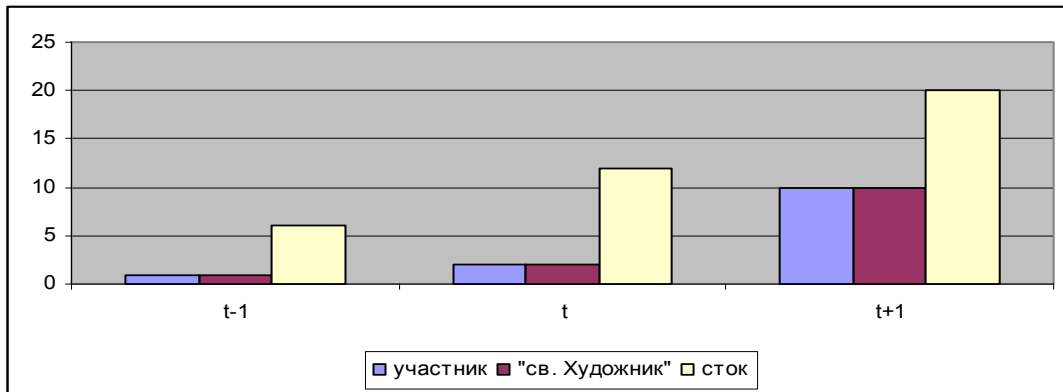


Рис 9, Распределение по заявкам и сток (второй случай).

Как видно из этих рисунков, в условиях дефицита при обоюдной “свободе”, оба участника получают по 10 единиц водных ресурсов, следовательно заслуга в снижении дефицита в первом случае определяется исключительно действиями участника, придерживающегося плана. Однако, при пропорциональной урезке по спросу наказанными оказались оба, причем в первом случае “св. художник” получил воды на 23% больше чем во втором, **является ли это справедливым решением?**, так как эти 23% получены за счет урезки первого участника, сумевшего организовать свое сельскохозяйственное производство с учетом реальных ограничений ирригационной системы, что является не меньшим (а может и большим) искусством в сравнении со стратегией, ориентированной преимущественно на погодные условия.

Эти примеры показывают, что правило (или правила) распределения водных ресурсов должны дифференцированно учитывать заявки различных участников, согласно их предыдущей истории и реального вклада в обеспечение устойчивого функционирования системы в целом. Трудности формулирования этих правил обусловлены не только неопределенностью отношений между участниками, но и динамичностью системы, где фактические воздействия проявляются лишь спустя некоторое время (время запаздывания). Таким образом, на этапе **Оперативное планирование**, критерий оценки распределения воды должен включать:

А) информацию об участнике:

- Плановые значения водоподачи за период $\{0 \dots t+1\}$,
- Заявленные значения на водоподачу за период $\{0 \dots t+1\}$,
- Фактические объемы водоподачи за период $\{0 \dots t-1\}$,

В) информацию о системе:

- Плановые значения водоподачи в систему за период $\{0 \dots t+1\}$,
- Фактические объемы водоподачи в систему за период $\{0 \dots t-1\}$,
- Фактические значения водоподачи по всем участникам за период $\{0 \dots t-1\}$,
- Прогнозные значения поступления стока в систему на интервал времени “t+1”.

Исходя из информационного обеспечения пунктов “А” и “В”, формируется необходимый набор показателей для этапа **Оперативное планирование**. Здесь сознательно использован тер-

мин “необходимый”, поскольку “достаточный” набор показателей будет определен, только после анализа этапа **Оперативное планирование**, где определяются параметры **управляемости системы**.

4.3 Оперативное управление.

Основная сложность **Оперативного управления** состоит в согласовании работы комплекса гидротехнических сооружений с динамикой движения воды в ирригационной системе. Наиболее важное его значение состоит в том, что именно с него начинается поступление обратной информации о фактическом выполнении установленных значений распределения воды между участниками, и именно он выполняет трансформацию фактического гидрографа в требуемый. На этапе **Оперативное управление**, как правило, отсутствуют какие-либо экономические критерии и основным показателем работы является степень выполнения, установленных значений водозабора за декаду и диапазон колебаний расходов в створе каждого участника за отдельные моменты времени. Оперативное управление осуществляется с помощью устройств автоматического регулирования, настраиваемых по верхнему или нижнему бьефу, в зависимости от конкретных условий и используемого регулятора. Диапазон используемых устройств регулирования расходов очень широк, начиная с простейшего затвора, до пункта диспетчерского управления, оснащенного современной вычислительной техникой. Как правило, чем выше техническая оснащенность пункта управления, тем меньше время реакции на изменения в системе, следовательно, уже диапазон колебаний мгновенных значений расхода. Последний показатель косвенно отражает требования, предъявляемые к управляемости системой, кроме того, он увеличивает точность учета, подаваемого расхода, а следовательно обеспечивает и лучший контроль распределения воды. Кроме показателей, отражающих распределение воды между участниками, на этапе **Оперативное управление**, используется набор показателей связанных с параметрами течения воды в ирригационной системе. Эта группа показателей опирается на значения уровней и расходов по участкам каналов, поскольку нормальное функционирование любого водозаборного сооружения возможно лишь при наличии уровня воды в подводящем канале не ниже некоторого минимального, обеспечивающего возможность водозабора. Этот минимальный уровень диктуется конструкцией конкретного гидротехнического сооружения, выполняющего водозабор, а поддержание этого уровня обеспечивается, либо подачей высоких значений расхода по основному каналу, либо другим гидротехническим сооружением, установленным непосредственно в канале (перегораживающим сооружением) с помощью, так называемой, “кривой подпора”. Задача согласования режимов работы перегораживающих сооружений и гидротехнических сооружений, обеспечивающих водозабор участников, называется “Задачей стабилизации режима водораспределения в системе”. Эта задача является центральной для этапа **Оперативное управление**, поскольку именно через ее решение конкретизируется понятие “**управляемости системы**”. Конкретные методы решения этой задачи, как и факторы доминирующие в управлении, различны для разных уровней иерархии и для различных типов ирригационных систем, однако обобщенный критерии оценки “**управляемости системы**”, можно достаточно просто сформулировать, если использовать понятие “**к.п.д. управления**”. Последний определяется, как отношение:

$$\text{“к.п.д. управления”} = \frac{\text{“суммарный расход воды, требуемый участникам”}}{\text{“расход в голове системы”} \times \text{“технический к.п.д.”}} \quad (4.1)$$

Следовательно обобщенный критерии оценки “**управляемости ирригационной системы**”, можно определить, как “*величину обратно пропорциональную дополнительному расходу воды, который необходимо подать в систему для выполнения требований участников*”. Отметим, что в реальных ирригационных системах, практически не бывает точного выполнения требований участников, поэтому оценка управляемости выполняется через косвенные показатели:

- относительная водообеспеченность в голове системы к средневзвешенной водообеспеченности всех участников системы,

- неравномерность водообеспеченности участников системы,
- неравномерность ежедневной водообеспеченности конкретного участника,
- относительная неравномерность водообеспеченности участников по удалению от головы системы.

Каждый показатель отражает определенные аспекты в *управляемости системы* и позволяет акцентировать внимание, как на определенном направлении процесса управления, так на отдельных участках системы с наибольшими отклонениями по какому либо показателю. Так, например, водообеспеченность участников по удалению от головы, обычно падает. Это падение водообеспеченности может быть обусловлено двумя причинами, перебором воды участниками, расположенными выше по течению, и неправильным распределением потерь вдоль канала. Первая причина, чаще всего, связана с недостаточной точностью учета отбираемых объемов воды, первыми по течению участниками, а вторая, с сильной нелинейностью функции потерь вдоль пути, поэтому попытки решения этой задачи через постоянные (средние или максимальные) значения к.п.д., заведомо несостоятельны. Как следствие этой проблемы, возникновение ряда методик, так или иначе связанных с понятиями “водооборота”. Одна из простейших, опирается на правило, “распределение воды начинается с обеспечения последнего (наиболее удаленного от головы) участника”. Метод распределения воды здесь следующий, исходя из доступного расхода (или пропускной способности канала если вода не лимитируется), по принципу максимальной удаленности от головы формируется группа участников. Участники последовательно включаются в группу, до тех пор пока не будет исчерпан доступный расход, а затем выполняется распределение воды для этой группы. По этому же принципу, формируется следующая группа и выполняется следующий этап распределения воды, и так далее, пока все участники не будут обеспечены водой. Этот подход не плохо зарекомендовал себя на каналах с древовидной структурой (одна голова, отсутствие петель) и равномерными требованиями участников. Диапазон реальных условий его применения очень ограничен. Особенно большие проблемы, при его использовании, возникают когда подача воды выполняется из нескольких каналов, в этой ситуации последний участник может стать первым и наоборот, в зависимости от того по какому каналу подается вода. В реальных условиях, шире применяется другой метод “водооборота”, суть которого состоит в следующем, общий интервал времени управления (например декада), разделяется на последовательность временных подинтервалов (например: сутки, двое суток, ...и т.п.), а все участники разбиваются на группы по условию одновременности. Таким образом, в каждый подинтервал времени распределение воды выполняется только между участниками, соответствующей группы, при этом, если жестко задан подинтервал времени, то варьируются участники группы, а если жестко заданы составы групп, то варьируются подинтервалы времени. Чем меньше выбирается подинтервал времени, тем меньше число участников в соответствующей группе и тем точнее выполнятся распределение воды. Гибкость второго метода “водооборота” намного выше, однако его практическая реализация значительно труднее и требует применения более совершенных методов расчета распределения воды.

Последней задачей этапа *Оперативное управление*, является задача учета и контроля, распределяемых водных ресурсов, которая формирует петлю обратной связи на этапы *Планирования*. Корректное решение этой задачи связано с наличием гидропостов, размещенных надлежащим образом, организаций сбора информации через требуемые промежутки времени и точностью гидрометрических устройств. Таким образом, набор основных показателей в задаче учета и контроля должен отражать:

- местоположение гидропоста,
- интервалы времени между замерами,
- характеристики гидрометрического оборудования.

Наиболее частая ошибка, которая допускается при расстановке гидропостов в ирригационных системах, связана с применением правил, используемых для электрических цепей, “количество измерительных устройств равно количеству входящих плюс количеству уходящих элементов минуса единица”. Причина кроется в потерях воды, которые невозможно опреде-

лить по аналогам, в силу индивидуальности каждого гидротехнического сооружения, поэтому количество гидропостов должно строго соответствовать количеству распределительных элементов объекта. Кроме гидропостов, обеспечивающих учет распределения воды между участниками, на длинных каналах возникает необходимость в периодической установке временных гидропостов для идентификации параметров, характеризующих потери воды на испарение и фильтрацию. Временные гидропосты устанавливаются на участках с резким изменением параметров канала и используются, преимущественно, при пропусках максимальных и минимальных расходов. После построения устойчивой кривой связи между расходами и потерями, надобность во временных гидропостах, как правило, отпадает. В существующей системе водораспределения измерения расходов воды выполняются от одного до трех раз в сутки на объектах *КСК* и *АВП* и до 24 суточных замеров на пилотных полях объектов *Фермерского хозяйства*. Частоту замеров на пилотных полях следует рассматривать, скорее как исследовательскую, требуемую условиями идентификации физико-химических параметров объектов, а не динамикой распределения воды. Поэтому, будем ориентироваться, примерно на 8 – 12 часовой интервал времени измерений, исключая объекты (уровень *КСК*), оборудованные автоматизированными системами. Более точную оценку интервалов времени и требований к измерениям и применяемому гидрометрическому оборудованию, можно будет выполнить, после завершения заданий по «анализу существующей системы водораспределения», деятельности №1 и №2, настоящего проекта.

5 Формализация процессов управления распределением воды

5.1 Постановка задачи управления

Применение методов теории управления для анализа распределения водных ресурсов, требует предварительной формализации всего исследуемого процесса, начиная от структуры ирригационной системы до реальных управляющих воздействий, выполняемых людьми, участвующими в этом процессе. Результатом этой формализации является математическая модель, в той или иной мере отражающая различные аспекты реальных процессов, возникающих в ирригационных системах. Согласно установившейся канонизации языка в современной теории управления [6], ирригационную систему будем рассматривать в виде динамического объекта, описываемого системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dw}{dt} = g(w, u, \xi, a, t); \quad (5.1)$$

здесь: w – n -мерный фазовый вектор, u – k -мерный ($k \leq n$) вектор-функция управления, ξ – m -мерный ($m \leq n$) вектор внешних воздействий, a – l -мерный вектор конструктивных и феноменологических параметров объекта, t – время.

Для ирригационных систем, вектор $w(t)$ – представляет собой объемы воды в различных областях пространства, занимаемого ирригационной системой, его значения называются фазовыми координатами, а его динамика – фазовой траекторией системы. Размерность n соответствует числу точек, в которых производится контроль состояния системы и в нашем случае это число \geq числу водополучателей. Вектор $\xi(t)$ – внешних воздействий, обычно представляет собой гидрографы стока, формирующегося в различных областях пространства, и воздействующего на ирригационную систему случайным образом. Это вектор задается с помощью соответствующих функций распределения. Вектор-функция управления $u(t)$ – соответствует расходам гидротехнических сооружений внутри системы и из нее, которые выбираются некоторым субъектом (или субъектами), для достижения заданных целей. Возможности по выбору величины $u(t)$ обычно ограничены параметрами гидротехнических сооружений и наличием самой воды, следовательно:

$$u(t) \in U(w, a, t); \quad \forall t \in T; \quad (5.2)$$

где: T - период управления.

Кроме этого, сами фазовые переменные ограничены конструкцией ирригационной системы и принятыми условиями эксплуатации.

$$w(t) \in W(a, t); \quad \forall t \in T; \quad (5.3)$$

Система уравнений (5.1) с ограничениями (5.2) и (5.3) называется управляемой системой, причем ограничения (5.2) – называются допустимым пространством управления, а выражения (5.3) – фазовыми ограничениями. Поскольку управляемые системы создаются для достижения чего либо, то основной задачей управления является определение функции $u(\bullet)$ по заданной **цели управления**. Обычно **цель управления** можно сформулировать в виде максимизации или минимизации некоторого функционала от управления, однако, как указано выше, при управлении ирригационной системой преследуются несколько целей, следовательно поиск управления $u(\bullet)$ следует осуществлять таким образом, чтобы экстремальных значений достигали сразу несколько функционалов. Подобная математическая задача, в реальных условиях, как правило не разрешима, поскольку множества допустимых управлений, доставляющих экстремумы разным функционалам оказываются не пересекающимися, например, характеристика “обеспеченность водой орошаемых площадей и водопотребителей” требует максимального наполнения ирригационной системы, а характеристика “объемы потерь водных ресурсов в системе” – наоборот, т.е. их экстремумы не совместимы. Методы теории управления позволяют обойти подобные проблемы. Для этого, в первую очередь, формируется основная цель управления в виде функционала, наилучшим образом соответствующего основному назначению ирригационной системы, а именно: - **воду, поступившую в систему, доставить в заданные области пространства в требуемые моменты времени**. Формально, требования к системе по доставке воды и фактически подаваемые расходы, выражаются векторами одинаковой размерности $q^*(t)$ и $q(t, u)$ – j - размерности ($j \leq n$), а **функционал цели**, обозначается, через $\aleph^0(u(\bullet))$. Маркировка **функционала цели** индексом “0”, показывает³, что в процессе поиска управлений, кроме этого функционала будут еще и другие, но для всех последующих функционалов поиск управления осуществляется лишь в области, оставшейся свободной после нахождения экстремумов предыдущих. Вторым функционалом $\aleph^1(u(\bullet))$, также имеющим специальное название, является **функционал качества управления**, который отражает стоимость или цену достижения основной цели, при условии, что существует не единственный способ ее достижения. Формально и ограничения (5.2) и (5.3) можно переформулировать в виде различных функционалов, но мы не будем этого делать, поскольку приведенная форма является более естественной для инженерных оценок. Для ирригационных систем **Функционал цели** можно формализовать не единственным образом, каждая его форма будет отражать сегодняшнее понимание исследователя или лица принимающего решения, какое распределение поступающей в систему воды является наилучшим. Поэтому, рассмотрим несколько выражений для **функционала цели**, оставляя окончательный выбор на обсуждение всех участников проекта. Общее выражение для **функционала цели** можно записать в виде:

$$\aleph^0(u(\bullet)) = \int_{t \in T} \varphi(q^*(t), q(t, u)) dt \rightarrow \max_{u \in U}, \quad (5.4)$$

из которого следует, что различные варианты оценки наилучшего распределения воды содержатся в выборе функции $\varphi(\cdot, u(\bullet))$. Для завершения формулировки этой задачи управления ирригационными системами в дифференциальной форме, остается указать, среди каких функций надо искать экстремум (**sup**). Задача (4.1)-(4.4) относится к классу задач оптимального управления с закрепленным временем, для которых допустимым решением является совокупность $(w(t), u(t))$ при выполнении следующих требований:

1. вектор-функция $u(\bullet)$ определена, и кусочно непрерывна на интервале времени $\{T\}$;
2. для всех $t \in \{T\}$ выполняется условие (5.2) и (5.3);

³ Здесь и далее верхние индексы обозначают принадлежность переменных к какой-либо семантической группе, а нижние индексы используются, как счетные, по которым выполняется суммирование, сортировка .

3. функции $w(t)$ дифференцируемы во всех точках, кроме тех, где $u(\bullet)$ терпит разрыв, при этом во всех точках дифференцируемости выполняются уравнения (5.1);
4. вектор-функции $q^*(t)$ и $\xi(t)$ определены и кусочно непрерывны на отрезке времени $\{T\}$, (эти функции неуправляемы, поскольку первая характеризуют требования со стороны орошаемых площадей и транзита, а вторая гидрограф стока),

Именно среди таких допустимых решений находятся экстремумы в задаче (5.1)-(5.4). В зависимости от детализации уравнений (5.1)-(5.3) и критерия управления (5.4) можно определить следующие задачи:

1. **Задача планирования водораспределения в ирригационных системах;** по ее результатам, уточняются объемы подачи водных ресурсов в соответствии с выделенными лимитами и назначается плановый режим работы гидротехнических сооружений. В терминах теории оптимального управления эта задача классифицируется как задача определения программной траектории системы.
2. **Задача корректировки** в терминах теории оптимального управления классифицируется, как задача синтеза управления или проектирование оператора обратной связи.

Задача корректировки является заключительной в любом процессе управления и принципиально[1] отличается от задачи определения программной траектории. В ней используются другие критерии качества, участвующие в формировании функционала, и другие методы решения. Она предназначена для реализации найденной ранее программной траектории. Если ошибки или отклонения в определении программной траектории приводят к экономическим потерям (достижение цели будет стоить дороже или значения некоторых показателей будут несколько хуже, чем предполагалось), то плохо спроектированный оператор обратной связи может разрушить систему управления и управляемый объект полностью (например, образование прорывов дамб на отдельных каналах), резко снизить управляемость всей ирригационной системы, что повлечет за собой огромные потери водных ресурсов. В общем случае поиск решения задачи синтеза труднее решения обычной задачи оптимального управления из-за отсутствия регулярных методов ее решения, а так же по причине отсутствия описания необходимых условий, которые служат отправной точкой при построении расчетных схем. Здесь в полной мере проявляются достоинства пакета программ GAMS. Он снимает с исследователя необходимость поиска метода решения и позволяет сосредоточиться на корректности формулировок математической модели и адекватности критериев распределения воды.

5.2 Критерии управления при распределении воды

Формулировку главного критерия управления *функционала цели* будем выполнять исходя из основных эксплуатационных характеристик функционирования ирригационной системы (см. Раздел 2). Во-первых, примем условие самостоятельности всех участников, это означает, что недобор или перебор воды у конкретного участника отражается только на нем, в этом случае функция φ будет аддитивной.

$$\varphi(q^*(t), q(t, u)) = \sum_{j \in J} \lambda_j \times \psi(q_j^*(t), q_j(t, u)); \quad (5.5)$$

где λ_j – коэффициент масштабирования отклонения по отдельному участнику
 $\psi(q_j^*(t), q_j(t, u))$ – отклонение фактической водоподачи от требуемой.

Условия самостоятельности всех участников, очень важное допущение в нашем анализе, поскольку именно оно, позволило записать выражение (5.5) в виде суммы. Если существует возможность обмена водой между участниками, минуя систему, то выражение (5.5) будет не корректным. В этом случае необходимо строить ориентированный граф возможного водообмена между участниками и уже на нем суммировать отклонения факта от требований. Этот вариант распределения воды используется при моделировании *фермерского хозяйства*. Необходимо уточнить семантику записи $q(t, u)$, поскольку в теории оптимального управления чаще используется запись $q(t, u(\bullet))$, чтобы подчеркнуть зависимость переменной от всей

функции управления. В данной работе в основном подразумевается равносильность этих выражений $q(t,u) \equiv q(t,u(\bullet))$, а когда будет рассматриваться динамика изменения переменной от функции управления в конкретный момент времени, введем обозначение $q(t, u(t))$. Выражение (5.5) все еще не определено и для завершения постановки (до формул, допускающих численную реализацию), требуется введения метрики, позволяющей вычислять и сравнивать отклонения между требуемым и фактическим расходом, для каждого участника. Именно выбор метрики будет определять условия сравнения правил распределения воды между участниками, поэтому рассмотрим несколько вариантов. Простейшей метрикой является среднеквадратичная, т.е.

$$\psi_j(t) = - [q_j^*(t) - q_j(t,u)]^2; \lambda_j=1; \forall j \in J, t \in T; \quad (5.6)$$

Знак “-” в выражении (5.6) означает, что в (5.4) будет выполняться минимизация квадратичного отклонения водоподачи по всей системе. Основным недостатком выражения (5.6) является ущемление участников с малыми объемами водозабора. Потому на практике [7], обычно используется нормировка отклонений, через значения общего объема водоподачи участника, а именно:

$$\psi_j(t) = - [q_j^*(t) - q_j(t,u)]^2; \lambda_j=1/w_j^*; \forall j \in J, t \in T; \quad (5.7)$$

здесь:

$$w_j^* = \int_{t \in T} q_j^*(t) dt; \forall j \in J; \quad (5.8)$$

Вместо квадратичного отклонения, в выражении (5.7), можно использовать отклонения по модулю, но это больше дело вкуса, чем реального улучшения распределения воды. Более серьезного улучшения водораспределения можно добиться, если рассматривать недостаток и избыток воды неравноценными, например:

$$\psi_j(t) = -\alpha_j(t) \times (q_j^*(t) - q_j(t,u))^2; \lambda_j=1/w_j^*; \forall j \in J, t \in T; \quad (5.9)$$

здесь:

$$\alpha_j(t) = \{ \alpha_1 \text{ при } q_j^*(t) > q_j(t,u); \alpha_2 \text{ при } q_j^*(t) < q_j(t,u) \} \quad (5.10)$$

При $\alpha_1 > \alpha_2$, в системе будут уменьшаться ситуации с недостатком подачи воды, а при $\alpha_1 < \alpha_2$, наоборот, - ситуации с избытком ее подачи. Первый случай подходит для территорий с хорошей дренируемостью или с большими уклонами, где недостача вызывает быстрое пересыхание земли. Второй подход к оптимизации важен для ирригационных систем с недостаточным или отсутствующим дренажем, когда подача воды больше требуемой может привести к ухудшению состояния земель, вплоть до заболачивания.

Интересные варианты в распределении водных ресурсов, возникают если использовать условия гарантированности⁴, в этом случае водоподачу участника $q_j^*(t)$ следует представить в виде суммы:

$$q_j^*(t) = \hat{q}_j(t) + \Delta q_j^*(t), \quad (5.11)$$

где: первое слагаемое является гарантированной водоподачей участника, а второе добавкой, требуемой для его хозяйственной деятельности. Естественно, что целевая функция должна особым образом реагировать на условия гарантированности. Ниже приводится вариант целевой функции ψ , удовлетворяющей этим условиям:

$$\psi_j(t) = -[\Delta q_j^*(t) / (q_j(t,u) - \hat{q}_j(t))] \times (q_j^*(t) - q_j(t,u))^2; \forall j \in J, t \in T; \quad (5.12)$$

где: $\lambda_j = 1/w_j^*$;

Выражение (4.12) позволяет удерживать значения водоподачи не ниже гарантированных, од-

⁴ Предложено рассмотреть В.А. Духовным, если в выражении (11) управление составляющими разделить по иерархиям, управление $\hat{q}_j(t)$ – сохранить за участником, а выбор $\Delta q_j^*(t)$ предоставить системе (всем участникам), то получится многокритериальная задача для анализа конфликтных ситуаций, попадающая в класс кибернетических систем, исследованных Ю.Б. Гермейером. Важной особенностью этих систем является то, что для них удается формализовать понятие гомеостаза и определить области устойчивого равновесия (условия коллективного равновесия для всех участников).

нако вопрос определения самих гарантированных значений водоподачи остается открытым. В качестве варианта решения этого вопроса можно предложить исследование вспомогательной задачи с гидрографом стока очень высокой обеспеченности $\xi(t) \sim 80\div 90\%$ и критерием цели (5.7). В результате решения этой вспомогательной задачи будут получены значения $q(t, u)$, которые можно принять в качестве $\hat{q}(t)$ и вернуться к решению основной задачи с критерием цели (5.11), (5.12) и гидрографом стока $\xi(t)$, установленным для рассматриваемого года. Для ирригационных систем этот прием возможен в силу того, что с уменьшением процента обеспеченности стока (увеличение фактического объема воды) допустимое пространство управления расширяется, то есть

$$U(w, a, t) |_{\xi(t) > 80\%} \subset U(w, a, t) |_{\xi(t) < 80\%}.$$

Помимо прямых значений расходов $q^*(t)$, в выражениях (5.7), (5.12), могут применяться их ценовые эквиваленты, определенные через продуктивность одного кубометра воды или одного орошаемого гектара у каждого участника. Введение экономических характеристик непосредственно в **функционал цели**, должно выполняться лишь после тщательного анализа хозяйственной деятельности участников, так как различия в продуктивности воды, приводящие к **неравноправию** участников, могут быть вызваны различными не зависящими от них причинами, (например, параметры почвы под сельскохозяйственными угодьями, к.п.д. внутри оросительной сети и т.д.). На данном этапе, выполнения проекта, более целесообразно, все элементы потерь воды в ирригационной системе, выделить в собственный функционал (**функционал качества управления**), который будет минимизироваться вслед за основным функционалом (**функционалом цели**). Выражение для **функционала качества управления** по экономии воды, можно записать в виде:

$$\mathfrak{N}^1(u(\bullet)) = \int_{t \in T} (\eta^T \bullet w(t)) dt \rightarrow \min_{u \in U} \quad (5.13)$$

где: η^T -технический коэффициент полезного действия участка канала (к.п.д.), определяемый как отношение, уходящего расхода к входящему, при отсутствии на нем потребления воды со стороны участников⁵. Поскольку w - вектор, то и η^T вектор той же размерности. Простота критерия по экономии водных ресурсов связана с “удачным” выбором фазовых переменных для описания динамики ирригационной системы.

Следующим этапом в решении задач оптимального управления распределением воды, является этап корректировки плановых расходов, в соответствии с реально складывающейся водохозяйственной обстановкой. Для этого общий период времени управления $\{T\}$, разобьем на три непересекающихся интервала $\{t^0 : t-1\}$ - прошлое, $\{t\}$ - настоящее и $\{t+1 : T\}$ - будущее. Все переменные, относящиеся к $\{t^0 : t-1\}$ являются известными, отражающими реальный график подачи и распределения водных ресурсов, который, будет отличаться от оптимального, полученного расчетным путем на этапе планирования. Причинами отличий являются :

- Отклонения в распределении водных ресурсов между участниками, обусловленные ограниченными возможностями гидротехнических сооружений,
- Отклонения в объемах фактической подачи водных ресурсов $\xi(t)$ в ирригационную систему,
- Отклонения в требованиях $q^*(t)$ водных ресурсов участниками, обусловленные различными климатическими факторами.

Совокупность этих трех причин формирует внутрисистемный дисбаланс за период $\{t^0 : t-1\}$, который приводит к необходимости корректировки расходов воды участникам, для следующих интервалов времени. Прежде чем формулировать варианты функционалов для распределения воды, заметим, что на **этапе оперативное планирование** появляется дополнитель-

⁵ Выражение $(\eta^T \bullet w)$ представляет собой скалярное произведение векторов, определяемое как:

$$(\eta^T \bullet w) = \sum_{j \in n} \eta_j^T \times w_j, \quad n - \text{размерность векторов } \eta^T \text{ и } w.$$

ный вектор, обозначим его через $\tilde{q}(t)$, размерности “ n ”, который отражает заявки участников, исходя из реально сложившихся климатических условий и хозяйственной деятельности самих участников. Особенность этого вектора в том, что в отличие от своего аналога $q(t)$, он определен только для части периода $\{t^0 : t+1\}$, поэтому, в настоящее время, значения водоподдачи участникам корректируются только для интервала времени “ $t+1$ ”. Результаты натурных обследований показывают, сильное расхождение между значениями заявок и требований, особенно в начале периода вегетации, однако их интегральные характеристики (суммарный объем забора воды) сближаются по мере увеличения периода $\{t^0 : t\}$. Специфическая особенность сельскохозяйственного производства состоит в том, что основной разброс в требованиях на воду между различными участниками определяется разбросом в датах сева сельскохозяйственных культур и сроках первого полива. Следовательно, по истечению сроков первых поливов необходимо выполнить уточнение вектора $q(t)$, используя информацию, содержащуюся в заявках и фактическом гидрографе стока, за прошедший период времени $\{t^0 : t\}$. В настоящее время подобное уточнение отсутствует, поэтому заявки участников становятся фактически единственным документом, определяющим корректировку объемов водоподдачи участникам на следующую декаду. Для уточнения вектора $q(t)$ сформируем новые требования $q^*(t)$ по формуле:

$$q^*(t) = \begin{cases} q^*(t) = q^R(t) \forall t \in \{t^0 : t\} \\ q^*(t) = q(t) + \delta q(t) \forall t \in \{t+1 : T\} \end{cases} \quad (5.14)$$

где: $q^R(t)$ – фактическая водоподдача участникам, а $\delta q(t)$ – невязка баланса за истекший период времени, вычисляется как:

$$\delta q(t) = \frac{\int_{t^0}^t (q^R(t) - q(t)) dt}{T - t}; \quad (4.15)$$

Для оставшейся части периода $\{t+1 : T\}$ выполним решение задачи (5.1) – (5.4) при критериях типа (5.7), используя новый вектор требований $q^*(t)$. Полученный вектор $q(t)$ и будет являться необходимым уточнением плана водопользования. Дальнейшую корректировку объемов водоподдачи участникам можно проводить по формулам:

$$q^R(t+1) = (q(t+1) + \tilde{q}(t+1) + \delta q(t)) / 2; \quad (5.16)$$

где невязка баланса $\delta q(t)$, как и ранее вычисляется по формуле (5.15).

5.3 Оперативное управление

Оперативное управление обеспечивает реализацию решений по распределению водных ресурсов, выработанных на предыдущих этапах (годовое и оперативное планирование), путем настройки параметров гидротехнических сооружений для поддачи установленного расхода. Основная сложность **Оперативного управления** состоит в согласовании работы комплекса гидротехнических сооружений с динамикой движения воды в ирригационной системе. Наиболее важное его значение состоит в том, что именно с него начинается поступление обратной информации о фактическом выполнении установленных значений распределения воды между участниками, и именно он выполняет трансформацию фактического гидрографа в требуемый. На этапе **Оперативное управление**, как правило, отсутствуют какие либо экономические критерии и основным показателем работы является степень выполнения, установленных значений водозабора за декаду и диапазон колебаний расходов в створе каждого участника за отдельные моменты времени. Оперативное управление осуществляется либо вручную, либо с помощью устройств автоматического регулирования, настраиваемых по верхнему или нижнему бьефу, в зависимости от конкретных условий и используемого регулятора. Диапазон используемых устройств регулирования расходов очень широк, начиная с простейшего затвора, до пункта диспетчерского управления, оснащенного современной

вычислительной техникой. Как правило, чем выше техническая оснащенность пункта управления, тем меньше время реакции на изменения в системе, что сокращает диапазон колебаний мгновенных значений расхода. Этот диапазон косвенно отражает требования, предъявляемые к управляемости системой, а его сокращение уменьшает погрешности учета подаваемого расхода и, следовательно, обеспечивает лучший контроль распределения воды.

Важной особенностью при выборе критериев для этапа *оперативное управление* является то, что любая ирригационная система имеет некоторую область неразличимости. Последнее проявляется в том, что если расход и объем воды, подаваемый потребителю (q_j, w_j) колеблются в некоторых пределах δq_j и δw_j , то для системы безразлично, в каком порядке эти колебания совершались и совершались ли они вообще. На рис.4 показано несколько типов управлений $u_j(t)$, которые с точки зрения системы равнозначны, т.е. из них невозможно назвать лучшее. Свойство неразличимости позволяет с одной стороны ослабить критерий, связанный с качеством водораспределения, а с другой – ввести следующий критерий, отражающий трудоемкость выполнения уже непосредственно самого управления.

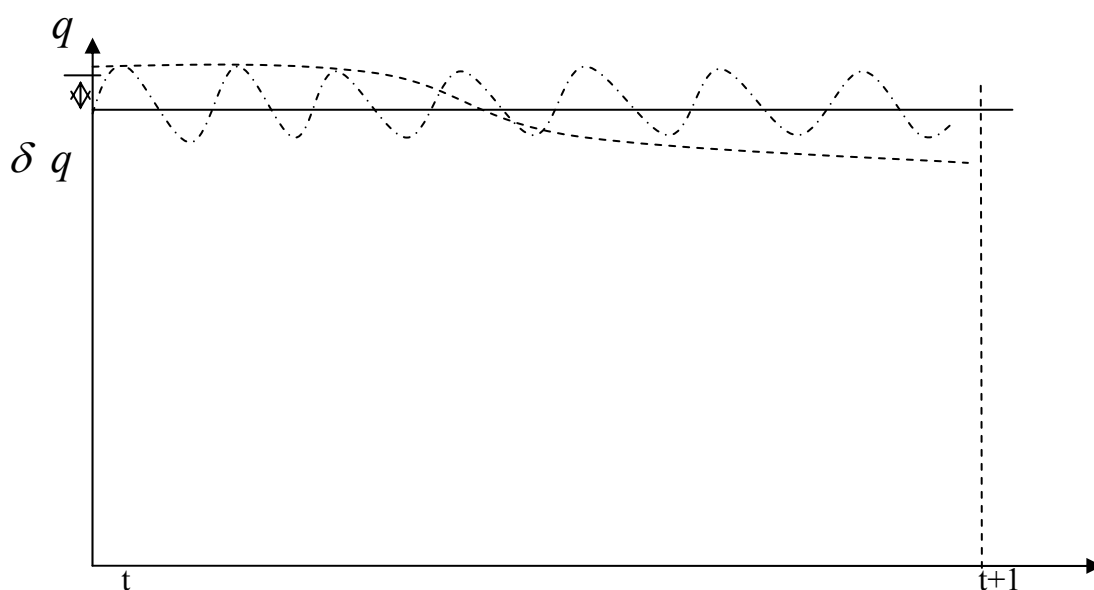


Рис.4. Типы управлений, равнозначные для системы.

5.4 Уравнения движения воды в ирригационных системах

Общее количество моделей, пригодных для решения рассматриваемой задачи, достаточно велико. Однако, все эти модели можно условно разделить на два типа. К первому типу относятся модели, в которых закон сохранения массы выполняется точно, а вместо закона сохранения импульса используется какое-либо упрощенное выражение. Ко второму – модели, в которых оба закона выполняются приближенно. Основное требование, которому должна удовлетворять адаптируемая модель, используемая для описания гидродинамических процессов в ирригационных системах, заключается в ее принадлежности к первому типу. Отказ от моделей второго типа обусловлен неконтролируемым отбором воды из системы, что может внести систематическую ошибку в числовые значения параметров модели при идентификации. Вопрос о возможности перехода к упрощенным моделям может быть решен положительно, если на рассматриваемом участке отсутствует машинный водоподъем, либо если функции управления аварийным режимом возложены на другой комплекс программ. Выбор упрощенной модели обычно диктуется конкретными особенностями ирригационной системы. При выборе так называемых адаптируемых моделей можно выделить ряд общих требований, которым они должны удовлетворять. В первую очередь модели должны давать возможность уточнения численных значений параметров объекта, используемых в модели, путем их идентификации. Формальное описание распределения водных ресурсов между элементами ирригационной системы: - каналами, отводами и контурами орошения, опирается

на законы сохранения массы воды, для каждого рассматриваемого интервала времени. В гидродинамике для этого метода используется термин «квазистационарное приближение», которое допустимо, если время релаксации процессов движения воды в системе значительно меньше интервала осреднения по времени. Для каналов второго и ниже порядка время релаксации процессов водораспределения не превышает двух – трех часов, следовательно, в моделях с интервалами осреднения «сутки», «декада» подобное приближение вполне приемлемо. Определим ориентированную сеть в виде $G(J,C)$, где $J=\{0,1, \dots, j\}$ -множество узлов, соответствующих гидротехническим сооружениям, а $C=\{0,1, \dots, c\}$ -множество дуг, определяющих каналы. Каждый элемент $c \in C$, характеризуется парой (j,i) , такой что $(\forall(j,i), j \in J, i \in J, i \neq j)$, где: j – начальный узел, а i - конечный узел, рассматриваемого канала “с”. Для периода T введем временную сетку $\{0,1, \dots, t\}$, T может быть, как периодом вегетации, так и меж вегетации. Обозначим через $Q_c(x,t)$ – расход в канале на расстоянии “х” от его начала, в момент времени t . Тогда расходы в начале и конце канала в момент времени t будут $Q_c(0,t)=Q_{j,c}(t)$ и $Q_c(L,t)=Q_{c,i}(t)$ соответственно. Из закона сохранения массы для каждого узла имеем уравнение:

$$\sum_{c \in C_j^-} Q_{j,c}(t) - \sum_{c \in C_j^+} Q_{c,j}(t) = 0; \quad \forall j \in J, t \in T \quad (5.17)$$

При ограничениях на пропускную способность каналов:

$$Q_c^{max} \geq Q_c(0, t) \geq Q_c(L, t) \geq 0; \quad \forall c \in C, t \in T \quad (5.18)$$

Где: T - период управления,

C_j^+ и C_j^- множества каналов, приходящих в узел “j” и уходящих из узла “j”, соответственно ($C_j^+ \subset C$; $C_j^- \subset C$).

Q_c^{max} – максимально допустимый расход по каналу “с”.

К каналу “с”, через координату “х” привязаны три набора (множества):

- множество отводов P_c , обеспечивающих подачу воды в контура орошения
- C_c^- - множество каналов, начинающихся из канала “с”,
- C_c^+ - множество каналов, заканчивающихся в канале “с”.

Кроме этого канал характеризуется длиной “ L_c ” ($L_c \geq x \geq 0$; $\forall c \in C$), и коэффициентом полезного действия “ η_c ”. Рассматривая “ η_c ” в качестве характеристики потерь воды из канала вдоль пути x , запишем уравнение для переменного расхода в виде:

$$\frac{dQ}{dx} = -\lambda \times Q; L \geq x \geq 0, \lambda > 0; \quad (5.19)$$

где: λ - интенсивность потери расхода вдоль канала, которую необходимо определить.

Рассматривая λ , в качестве некоторой постоянной для данного канала и интегрируя уравнение (5.19) с учетом условий на концах интервала:

$$Q(0)=Q(0, t) \text{ и } Q(L) = \eta \times Q(0,t); \quad (5.20)$$

Получим основное уравнение для расхода в произвольном сечении канала “х”:

$$Q_c(x, t) = Q_c(0, t) \times \exp\left(\frac{x}{L_c} \ln \eta_c\right); L, \geq x \geq 0; \quad (5.21)$$

Из уравнения (5.21) находим связь между расходами в сечениях канала x_1 и x_2 :

$$Q_c(x_2, t) = Q_c(x_1, t) \times \exp\left(\frac{x_2 - x_1}{L_c} \ln \eta_c\right); L_c \geq x_2 \geq x_1 \geq 0; \quad (5.22)$$

Используя уравнение (5.22), найдем значение расхода в голове канала при произвольном количестве потребителей вдоль его длины:

$$Q_c(0, t) = Q_c(L, t) / \eta_c + \sum_{p \in \{P_c\}} [q_p(t) \times \exp(-\frac{x_p}{L_c} \ln \eta_c)]; L_c \geq x_p \geq 0; \quad (5.23)$$

Где $q_p(t)$ - расход в “р” – й контур орошения в момент времени “t”, а $Q_c(L, t)$ - расход в конце канала “с”.

6 Формальное описание КСК.

6.1 Структура КСК

Крупная оросительная система или канал, КСК – верхний иерархический уровень моделирования в рамках, выполняемого проекта ИУВР – Фергана. Исследуемый объект определяется как комплекс гидротехнических сооружений обеспечивающих магистральную переброску и распределение водных ресурсов между различными **АВП** и **фермерскими хозяйствами**, с последующим контролем фактически поданных объемов воды. Источниками получения водных ресурсов являются ресурсы от уровня **БВО** и местных источников. Уровень управления **КСК**, опирается на заявки от **АВП** и от **фермерских хозяйств** и помимо экономических характеристик водопользователей, требует детального технико-экономического учета работы всех гидротехнических сооружений, при различных условиях эксплуатации, включая аварийные и волновые режимы. Поэтому формальное описание функционирования объекта опирается на законы гидродинамики и уравнения гидравлики сооружений. Геометрия основного объекта описывается набором поперечных сечений, отражающих отметки земли, коэффициенты потерь и шероховатости русла, а гидротехнические сооружения формализуются с помощью специального набора функций, учитывающих месторасположение и специфические особенности работы этих сооружений. Граничные условия формируются по условиям фактической водности и лимитам установленным, вышестоящим уровнем Управления (БВО). План водопользования формируется по заявкам **АВП** в декадном и месячном разрезах, и корректируется в соответствии с выделенными лимитами. Управление выполняется, начиная с декадной периодичности до суточной, в зависимости от колебаний гидродинамических процессов.

6.2 Элементы КСК

Канал – характеризуется набором участков, увязанных в виде ориентированной сети.

Участок канала имеет следующие характеристики:

- код канала родителя, с которого начинается данный канал,
- код канала или транзитного сброса, на котором заканчивается канал,
- длина канала,
- значение к.п.д. канала,
- значение максимальной пропускной способности канала (определяется либо по условиям функционирования самого канала либо по возможностям его головного сооружения).
- набор **отводов** из канала, обеспечивающих подачу воды во внешние узлы (**фермерские хозяйства** и **контура орошения**).
- набор гидрометрических сооружений.

Отвод из канала - характеризуется следующим набором показателей:

- код канала, на котором расположен отвод,
- местоположение отвода на канале (измеряется пикетажом),
- значение максимальной пропускной способности отвода,
- код внешнего узла (**контура орошения** или **фермерского хозяйства**).

Гидрометрическое сооружение - имеет следующие показатели:

- код канала,
- местоположение сооружения на канале (измеряется пикетажом),
- тарировочная кривая или соответствующая формула $Q(h)$,

Контур орошения – определяется:

- кодом **фермерского хозяйства**,
- набор гидромодульных районов,
- набор отводов, через которые подается вода.
- набор каналов, в которые сбрасываются избытки поверхностного стока,
- набор контуров орошения принимающих избытки поверхностного стока.

Гидромодульный район характеризуется:

- площадью,
- составом сельскохозяйственных культур,
- нормами орошения для каждой сельскохозяйственной культуры,
- к.п.д. управления для используемой техники орошения.

Сельскохозяйственная культура характеризуется:

- площадью, в привязке к гидромодульному району,
- датой сева,
- периодом выращивания (время с момента сева до полного сбора урожая),

7 Формальное описание АВП.

7.1 Структура АВП

Ассоциация водопользователей, АВП - объект второго уровня иерархии в системе ИУВР – Фергана, представляет собой сеть каналов, увязанных между собой комплексом гидротехнических сооружений с измерительными устройствами и средствами передачи информации. Основные функции *АВП* заключаются в формировании требований на объемы водных ресурсов, корректировке этих требований, в соответствии с выделенными лимитами, обеспечении распределения, получаемых водных ресурсов, между отдельными *фермерскими хозяйствами* и *контурами орошения*, и последующим контролем фактических объемов воды. Источниками получения водных ресурсов являются ресурсы от уровня *КСК* и местных источников.

Структура *АВП* формализуется в виде ориентированной многосвязной сети, где дугами являются однородные участки каналов, а узлами – гидротехнические сооружения. Узлы сети разделяются на внешние и внутренние. Внутренними узлами сети являются водораспределители. Внешними узлами сети являются гидротехнические сооружения, обеспечивающие подачу водных ресурсов и отвод транзитного стока, а также *фермерские хозяйства* и *контура орошения*.

На вход модели оросительной сети подаются:

Гидрографы:

- от трансграничных источников водных ресурсов (*КСК*),
- от местных источников водных ресурсов.

Требования:

- от *контуров орошения* и *фермерских хозяйств* (определяются по площадям орошения сельскохозяйственных культур в соответствии с гидромодульным районированием),
- гидрографы транзита.

Показатели:

- относительная значимость участников (*контуров орошения* и *фермерских хозяйств*) в ирригационной системе.

Во внутренних узлах сети, через которые выполняется управление распределением водных ресурсов, строго выполняются законы сохранения массы воды, кроме этого, каждый узел, соответствующий *фермерскому хозяйству* или *конттуру орошения*, имеет измерительное оборудование и комплекс технико-экономических показателей, отражающих его сельскохозяйственное производство (нижний уровень иерархии). Сеть, описывающая структуру *АВП*, строится из набора каналов, ориентированных по направлению движения воды. К каждому каналу привязан последовательный набор отводов, таким образом, что каждый отвод строго связан с одним *конттуром орошения*, однако, в один *конттур орошения* вода может поступать из нескольких отводов.

7.2 Элементы АВП

Канал имеет следующие характеристики:

- код канала родителя, с которого начинается данный канал,
- местоположение данного канала на канале родителе (измеряется пикетажем),
- код канала АВП или транзитного сброса, на котором заканчивается канал,

- длина канала,
- значение к.п.д. канала,
- значение максимальной пропускной способности канала (определяется либо по условиям функционирования самого канала либо по возможностям его головного сооружения).
- набор выходящих каналов,
- набор входящих каналов,
- набор *отводов* из канала, обеспечивающих подачу воды во внешние узлы (*фермерские хозяйства* и *контура орошения*).
- набор гидрометрических сооружений.

Отвод из канала - характеризуется следующим набором показателей:

- код канала, на котором расположен отвод,
- местоположение отвода на канале (измеряется пикетажом),
- значение максимальной пропускной способности отвода,
- код внешнего узла (*контура орошения* или *фермерского хозяйства*).

Гидрометрическое сооружение - имеет следующие показатели⁶:

- код канала,
- местоположение сооружения на канале (измеряется пикетажом),
- тарировочная кривая или соответствующая формула $Q(h)$,

Контур орошения – определяется:

- кодом *фермерского хозяйства*,
- набор гидромодульных районов,
- набор отводов, через которые подается вода.
- набор каналов, в которые сбрасываются избытки поверхностного стока,
- набор контуров орошения принимающих избытки поверхностного стока.

Гидромодульный район характеризуется:

- площадью,
- составом сельскохозяйственных культур,
- нормами орошения для каждой сельскохозяйственной культуры,
- к.п.д. управления для используемой техники орошения.

Сельскохозяйственная культура характеризуется:

- площадью, в привязке к гидромодульному району,
- датой сева,
- периодом выращивания (время с момента сева до полного сбора урожая),

⁶ В исходном варианте Гидрометрическое сооружение привязывалось и к отводам, однако в процессе обследования установлено, что на отводах используется переносное гидрометрическое оборудование, которое может иметь различные характеристики в разные моменты времени. Поэтому для объектов типа «отвод», гидрометрия перенесена в раздел переменной информации.

Литература.

1. Н.Н.Моисеев “Математические задачи системного анализа”, М., «Наука», 1981г., 487с.
2. М.Пешель “Моделирование сигналов и систем”, М, «Мир», 1981г.,300с.
3. В.А.Духовный, «Ирригационные комплексы на новых землях Средней Азии», Ташкент, «Узбекистан», 1983г.184с.
4. Д.Лаукс, Дж.Стединжер, Д.Хейт, «Планирование и анализ водохозяйственных систем». М., Энергопромиздат, 1984г. 400с.
5. Э.П.Сейдж, Ч.С.Уайт, Ш “Оптимальное управление системами”, М., «Радио и связь», 1982г.,391с.
6. Л.С.Понтрягин, В.Г.Болтянский, Р.В.Гамкредидзе, Е.Ф.Мищенко “Математическая теория оптимальных процессов”, М., «Наука», 1983г., 392с.
7. NATO SFP 974357 “Integrated Water Resources Management for Wetlands Restoration in the Aral Sea Basin”, 2000.
8. Духовный В.А.,Тучин А.И. «Управление ирригационными системами», Сб. МФСА, НИЦ МКВК №5, Ташкент 2001г., с 4 – 10.
9. Умаров У., Тучин А. Оперативное управление водохозяйственным комплексом на базе автоматизированных систем. – В сб. Проблемы развития водных ресурсов в аридных зонах. Экономическая комиссия ООН для Африки, ММиВХ СССР, САНИИРИ. Ташкент, 1986. с. 300 – 314.