

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации

Департамент мелиорации

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«РОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПРОБЛЕМ МЕЛИОРАЦИИ»
(ФГБНУ «РосНИИПМ»)

УДК 626.82

А. А. Чураев, Л. В. Юченко, М. В. Вайнберг, Е. В. Павелко,
Т. А. Погоров, А. Е. Шепелев, В. В. Митров

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ВОДОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ
НА ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

Научный обзор

Новочеркасск 2014

Содержание

Введение	3
1 Особенности оросительной системы как объекта автоматизации	4
2 Способы автоматизации процесса водораспределения	9
3 Способы управления и схемы регулирования процессов водораспределения на оросительной системе	21
4 Информационные и математические средства обеспечения при автоматизации оросительных систем.....	28
4.1 Использование методов расчета неустановившегося движения воды	30
4.2 Использование методов моделирования при решении задачи оперативного управления водораспределением	33
4.3 Требования к системе автоматизированного управления водораспределением	34
4.4 Объекты регулирования, их параметры и основные свойства	36
4.5 Создание математических моделей объекта.....	45
Заключение	48
Список использованной литературы.....	50

Введение

Повышение эффективности управления водораспределением на оросительной системе является одним из основных вопросов орошаемого земледелия.

В настоящее время к недостаткам управления водораспределением на оросительной системе можно отнести:

- технологически необоснованное завышение заборов воды в оросительную сеть, что приводит к излишним затратам на ее транспортировку, образованию дефицита для потребителей и непроизводительным сбросам, а также возможности возникновения аварийных ситуаций, связанных с возможными переливами или опорожнениями каналов;

- поддержание в бьефах каналов завышенных командных уровней, способствующих увеличению фильтрационных процессов, приводящих к повышению уровня грунтовых вод и подтоплению прилегающих территорий;

- низкую оперативность управления подачей воды водопользователям, приводящую к нарушению сроков и норм полива и, в конечном итоге, к снижению урожайности или гибели сельскохозяйственных культур.

Сведение потерь оросительной воды к минимуму, обеспечение соответствия объемов водозабора и водопотребления возможно при условии существенного повышения качества управления процессами водораспределения путем автоматизации узловых сооружений оросительной сети.

При автоматизации особое значение должно придаваться средствам математического описания и алгоритмизации процессов, происходящих в системе управления водораспределением. С одной стороны, они должны обеспечивать возможность имитационного моделирования поведения системы в различных режимах работы, с другой – обеспечивать достаточную точность расчета уровней, расходов и др. параметров, обладать достаточным быстродействием, учитывать особенности конкретной оросительной системы, быть простыми в реализации.

1 Особенности оросительной системы как объекта автоматизации

К основным функциям оросительной системы относят забор воды из источника орошения, ее транспортирование и распределение между потребителями в соответствии с планами полива и поливными нормами. От качества выполнения данных функций зависит не только эффективность работы оросительной системы в целом, но также эффективность орошения и орошаемого земледелия на системе.

Для выполнения функций транспортирования воды и ее распределения между потребителями должна быть четкая организация водораспределения на оросительной системе, включающая согласованную работу всех гидротехнических сооружений системы при наличии большого количества технологических, ресурсных и прочих ограничений.

Оптимальным решением данной задачи является автоматизация процесса управления оросительной системой, которая в свою очередь не представляется без современных приборов, оборудования и средств вычислительной техники.

Автоматизация управления оросительными системами помогает решить такие вопросы, как:

- обеспечение сельскохозяйственных культур водой в соответствии с их потребностью (планом водопользования), что способствует повышению урожайности, предотвращению подъема уровня грунтовых вод и вторичного засоления почв;

- экономия воды и возможность орошения дополнительных площадей, что особенно актуально при ограниченных водных ресурсах в засушливых районах;

- сокращение времени на выполнение технологических операций и повышение производительности труда обслуживающего персонала.

Вопросам совершенствования и оптимизации водораспределения на оросительных системах посвятили свои исследования известные ученые, такие как Я. В. Бочкарев, Е. Е. Овчаров, М. З. Ганкин, А. Л. Ильмер,

П. И. Коваленко, О. П. Кисаров, Э. Э. Маковский, М. Ф. Натальчук, В. И. Ольгаренко, В. Н. Щедрин, Ю. Г. Иваненко, В. И. Коржов, В. Я. Бочкарев [1-11] и другие. Их научные работы посвящены исследованиям рационального распределения и использования водных ресурсов, начиная от теоретического обоснования целесообразности создания оросительной системы и заканчивая внедрением в производство совершенных технологий управления водораспределением с учетом принципов автоматизации и телемеханизации.

К особенностям оросительных систем как объектов автоматизации технологических процессов, независимо от конструктивного исполнения и размеров по площади, можно отнести ряд общих черт [12]:

- единство функционирования всех звеньев оросительной системы, составляющих целостный технологический цикл;

- однотипность транспортирующих водоводов (каналов, трубопроводов) большой протяженности и различной конфигурации;

- однотипность управляемых (регулируемых) сооружений и их узлов, гидромеханических установок, сооружений и устройств водоучета и контроля на водоводах;

- волновой характер движения воды при ее транспортировании и распределении;

- недостаточность изученности процессов неустановившегося движения воды в каналах, осложняющих водоучет, и установление функциональных зависимостей расхода и уровня от времени в контролируемых створах и т. п.;

- наличие прямой (при некоторых условиях и обратной) гидравлической связи между управляемыми объектами, что делает их взаимозависимыми через водную среду;

- расположенность объектов автоматизации на открытом воздухе и подверженность их непосредственному воздействию окружающей среды;

- редкое изменение режима работы управляемых сооружений (может

оставаться постоянным в течение нескольких суток, согласно плану водопользования);

- необходимость непрерывного обмена информацией между объектом управления (водозаборный узел, распределительные сооружения и т. п.) и диспетчерским пунктом (система управления);

- усложненность работы водомерных сооружений, приборов и устройств водоучета (запыленность, влажность, волновые процессы, размыв русла водовода, отложение наносов или зарастания русла, неравномерность режима течения воды);

- отсутствие поблизости от объектов автоматизации (вдоль водоводов) источников электроснабжения.

На существующих оросительных системах как у нас в стране, так и за рубежом еще недостаточно внедрено автоматическое управление водораспределением. Это объясняется тем, что многие вопросы, связанные с внедрением автоматизации водораспределения и водорегулирования, не решены не только в практическом, но и в теоретическом плане. Построенные оросительные системы в 60-70 годах прошлого столетия рассчитывались на ручное управление объектами. Процесс водораспределения управлялся централизованно с диспетчерского пункта при помощи телефонной связи. Перевод таких систем на автоматическое управление сопряжен с определенными трудностями, связанными с большой разветвленностью объектов управления, инерционностью переходных процессов, действиями большого количества случайных факторов, влияющих на формирование урожая, недостаточностью научно-исследовательской и нормативно-методической информации.

На современном этапе ведутся работы в направлении автоматизации вновь создаваемых (проектируемых) и существующих (подлежащих реконструкции) оросительных систем. К главным задачам автоматизации мелиоративных систем относятся автоматизация водозабора, водораспределения, регулирование уровня грунтовых вод, учета воды. Исходя из того,

что технологический процесс на оросительной системе рассматривается как единое целое, предусматривается автоматизация всех составных частей системы, постепенно выводя их к одному уровню.

Объем автоматизации зависит от типа системы, особенностей ее конструкций и технологии работы и состоит из автоматизации учета и контроля протекания технологического процесса, состояния оборудования; автоматизации защиты от возможных аварий и повреждений; автоматизации работы объекта в целом, т. е. автоматизации совокупности различных операций, определяющих технологию работы объекта; комплексной автоматизации объектов и систем, включающей сочетание мероприятий, необходимых для осуществления всех технологических операций на системе [1].

Степень автоматизации зависит от степени развития производственных процессов и конструктивного исполнения мелиоративной системы в целом.

Для осуществления полной автоматизации необходимо наличие разработанного и проверенного в производственных условиях алгоритма управления; создание необходимых средств автоматизации; применение компьютерных программ управления; накопление опыта эксплуатации средств автоматизации; наличие квалифицированного персонала по обслуживанию, профилактике и ремонту всех средств автоматики.

Наряду с осуществлением автоматизации технологических процессов на современных крупных оросительных системах внедряется и телемеханизация, что позволяет связать в единое целое отдельные части автоматизированной системы, позволяющие не только ими управлять, но и контролировать их работу.

В мелиоративной практике сложились два различных подхода к осуществлению автоматизированного управления технологическими процессами на системах:

- централизованное управление всеми объектами на системе (гидротехнические водовыпускные и регулирующие сооружения, насосные стан-

ции перекачки и подкачки, работающие на закрытую сеть) с центрального диспетчерского пункта по схеме «сверху вниз»;

- децентрализованное управление по схеме «снизу вверх» с помощью устройств местной автоматизации в сочетании с обратной гидравлической и электрической связью в сети каналов и трубопроводов с проведением централизованного контроля.

В некоторых случаях возникает необходимость создания на системе отдельных регулирующих емкостей, чтобы обеспечить оперативную и бесперебойную работу системы при непрерывной водоподаче и прерывистом водозаборе, исключая технологические сбросы.

Особенности оросительных систем как объектов автоматизации и режимов их работы определили следующие основные виды водораспределения [12]:

- пропорциональное водораспределение всего стока (расхода) воды, поступающего в канал, между водопотребителями в заданном соотношении;
- нормированное водораспределение по плану водопользования;
- водораспределение по требованию или ненормированное.

В системах пропорционального водораспределения управляющие воздействия обеспечивают распределение между потребителями возмущений водоподачи, стохастически поступающих с вышерасположенных объектов. Такое водораспределение применяют преимущественно как межсистемное, но нередко применяется в целом на оросительных системах или ее звеньях, как межхозяйственное.

Нормированное водораспределение применяется при остром дефиците водных ресурсов. Управляющие воздействия в системах нормированного водораспределения компенсируют и локализуют возмущения водоподачи, поступающие стохастически от источника орошения и выше расположенных объектов и детерминированно от потребителей.

Водораспределение по требованию применяют на рисовых оросительных системах при программированном орошении. Управляющие воз-

действия в системах водораспределения по требованию компенсируют и локализуют возмущения водоподачи, поступающие стохастически как сверху (со стороны источника орошения и выше расположенных объектов), так и снизу (со стороны потребителей).

На оросительной системе могут одновременно использоваться различные виды водораспределения даже в пределах одного канала [12].

2 Способы автоматизации процесса водораспределения

На оросительных системах применяют следующие основные способы автоматизации водораспределения [1, 2]:

- регулированием уровня воды;
- регулированием перепада уровней воды;
- регулированием объема (расхода) воды.

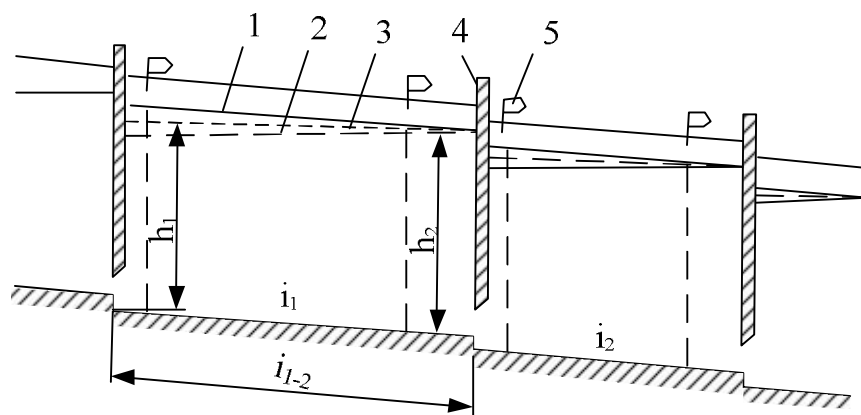
При способе автоматизации водораспределения регулированием уровня воды, ее распределение и подача в отводы на оросительной системе обеспечивается посредством стабилизации (поддержанием) на заданной отметке уровня воды в верхнем или нижнем бьефах гидротехнических сооружений межхозяйственной сети (водораспределительные узлы, перегораживающие и сбросные сооружения, водовыпуски и т. п.). В зависимости от стабилизируемого уровня различают автоматизацию регулированием по верхнему бьефу, регулированием по нижнему бьефу, смешанным регулированием.

Автоматизация регулированием по верхнему бьефу представляет собой нормированное (лимитированное) водораспределение, при котором вода между потребителями распределяется сверху вниз (от головного водозабора потребителям) посредством стабилизации уровня воды в верхних бьефах перегораживающих сооружений и в соответствии с планом водопользования и ресурсами воды.

При автоматизации водораспределения по этому способу головное сооружение старшего канала (магистрального или межхозяйственного)

оборудуется средствами автоматизации, обеспечивающими поступление в систему заданного расхода независимо от колебаний уровня в источнике орошения. Головное сооружение управляется с диспетчерского пункта системы. Распределение поступающей в систему воды автоматизируется на канале старшего порядка путем установки перегораживающих сооружений, автоматически поддерживающих (стабилизирующих) заданные уровни в верхнем бьефе, а на отводах – автоматических или автоматизированных водовыпускных сооружений. В концевых и в особо ответственных местах системы для сброса, образующихся при регулировании излишков воды, а также для определения возможных аварий устанавливают сбросные сооружения автоматического действия.

Перегораживающие сооружения делят канал старшего порядка на ряд участков (бьефов), на протяжении которых колебания уровня воды поддерживаются в пределах, обеспечивающих командование и необходимую точность подачи в отвод заданного расхода воды при изменении транзитного расхода от Q_{\max} до Q_{\min} . Кривые свободной поверхности воды при автоматизации регулированием по верхнему бьефу показаны на рисунке 1 [1].



- 1, 2, 3 – линии кривой свободной поверхности воды: (1 – при Q_{\max} ; 2 – при $Q=0$; 3 – при $Q_{\max} > Q > 0$); 4 – автоматизированное перегораживающее сооружение; 5 – водовыпуск; h_1 – глубина воды в начале участка, находящегося в зоне влияния перегораживающего сооружения; h_2 – глубина перед перегораживающим сооружением, устанавливаемая из условия пропуска максимального расхода; i – уклон канала

Рисунок 1 – Кривые свободной поверхности воды при автоматизации регулированием по верхнему бьефу

Глубина h_2 перед перегораживающим сооружением устанавливается из условия пропуска максимального расхода Q_{\max} . В начале участка, находящегося в зоне влияния этого сооружения, глубина равна [1]:

$$h_1 = h_2 - \Delta h, \text{ м}, \quad (1)$$

где h_1 – глубина воды в начале участка, находящегося в зоне влияния перегораживающего сооружения, м;

h_2 – глубина перед перегораживающим сооружением, устанавливаемая из условия пропуска максимального расхода, м;

Δh – величина колебания уровня воды, м.

Допустимая величина колебания уровня воды Δh в месте расположения наиболее удаленных от перегораживающего сооружения водовыпусков назначается при соблюдении следующих условий:

- подпорный уровень воды при минимальном расчетном расходе должен обеспечивать командование над уровнями в каналах младшего порядка;

- перепады уровней на водовыпусках должны быть достаточными для подачи в отводы плановых расходов с необходимой точностью.

Известно, что от величины Δh зависят расстояние между водоподпорными сооружениями и их число. С увеличением допустимого Δh уменьшается общее число перегораживающих сооружений.

Число и расположение перегораживающих сооружений зависят от типа и числа боковых водовыпусков, их расположения и расстояний между ними, от гидравлических характеристик канала (расход, уклон и т. п.), от требуемой точности регулирования уровня перед отводами и др. Расстояние между перегораживающими сооружениями определяется расчетом кривых свободной поверхности воды известными в гидравлике способами. Глубина перед перегораживающим сооружением устанавливается из условия пропуска максимального расхода Q_{\max} .

В таблице 1 приведены данные о расстояниях между перегоражи-

вающими сооружениями при условии, что $\Delta h = 0,1 h_2$ и $Q_{\min} = 1/4 Q_{\max}$. Расчеты выполнены методом Н. Н. Павловского. Полученные расчетные данные показывают, что длина кривой подпора между расчетными сечениями зависит главным образом от расхода и уклона и незначительно от влияния заложения откосов и коэффициентов шероховатости [1].

Таблица 1 – Расстояния между перегораживающими сооружениями в зависимости от гидравлических характеристик канала

В метрах

Q_{\max} , м ³ /с	$\beta = 2, m = 1, n = 0,025$			$\beta = 2, m = 1,5, n = 0,025$			$\beta = 2, m = 1, n = 0,017$		
	уклон								
	0,001	0,0005	0,0001	0,001	0,0005	0,001	0,001	0,0005	0,001
1	76	174	1090	63	147	1090	62	152	955
5	128	303	2070	129	274	1950	105	250	1700
10	170	382	2720	162	353	2545	147	344	2220
20	226	520	3500	205	470	3240	182	450	2960
Примечание – $\beta = b/h$ – относительная ширина канала; m – заложение откосов; n – коэффициент шероховатости.									

При автоматизации регулированием по верхнему бьефу уровни воды в бьефах каналов колеблются между свободной поверхностью, соответствующей нормальной глубине при максимальном расходе (рисунок 1) и при транзитном расходе $Q = 0$. Если транзитный расход изменяется, перегораживающее автоматически стабилизирует уровень воды в своем верхнем бьефе на заданной отметке, при этом кривые свободной поверхности занимают промежуточное положение, пересекаясь в одной точке, соответствующей $H = \text{const}$.

При данном способе автоматизации водораспределения авторами [3] утверждается существование только прямой гидравлической связи между бьефами перегораживающих сооружений. Обратная гидравлическая связь отсутствует. Иными словами, всякое изменение режима вышерасположенных бьефов сказывается на изменении режима нижерасположенных, т. е. возникшее возмущение распространяется лишь вниз по течению.

Способ автоматизации регулированием по верхнему бьефу наиболее простой и распространенный. Он позволяет достаточно точно и надежно снабжать по плану водой потребителей с помощью сравнительно простых

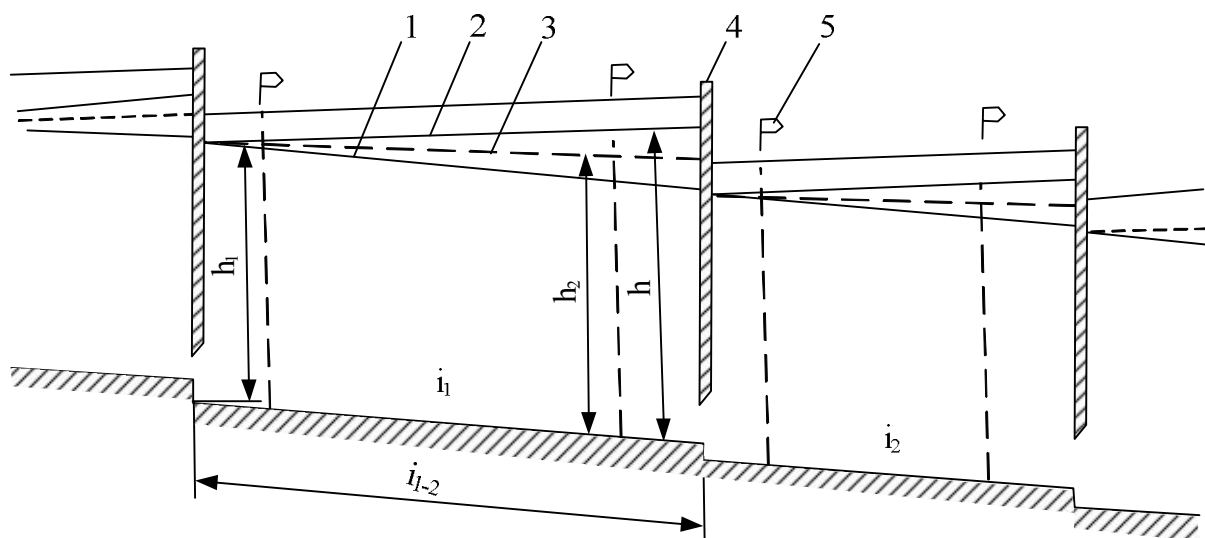
гидротехнических сооружений. В случае ограничения ресурсов воды или возникновения опасности засоления или заболачивания земель этот способ часто оказывается единственно возможным.

При нарушении планового водопотребления рассматриваемый способ имеет и свои недостатки:

- вероятность недополучения необходимого количества воды водопользователями, наиболее удаленными от головы канала;
- неизбежность возникновения при регулировании излишков воды технологических сбросов.

Для устранения отмеченных недостатков в концевых и особо ответственных местах оросительной системы необходима установка автоматических сбросных сооружений с размещением в этих местах небольших водохранилищ или бассейнов для аккумуляции и полезного использования сбросной воды. Но наибольшей эффективности можно добиться при использовании на оросительных системах с автоматизацией регулирования по верхнему бьефу централизованного диспетчерского контроля и управления. Оснащение системы средствами автоматики и телемеханики обеспечивает оперативный контроль за состоянием всех сооружений линейного водораспределения и выполнением планового водопользования, что позволяет своевременно обнаруживать и устранять отклонения от заданного режима работы, обеспечивая баланс между водозабором и водопотреблением.

При автоматизации водораспределения регулированием по нижнему бьефу потребителям предоставляется возможность пользоваться водой (в пределах плана водопользования) в зависимости от их потребности. Это обеспечивается путем установки перегораживающих сооружений по длине старшего канала, автоматически поддерживающих постоянные заданные уровни в своих нижних бьефах (рисунок 2) [1].



1, 2, 3 – линии кривой свободной поверхности воды: (1 – при Q_{\max} ; 2 – при $Q=0$; 3 – при $Q_{\max} > Q > 0$); 4 – автоматизированное перегораживающее сооружение; 5 – водовыпуск; h_1 – глубина воды в начале участка, находящегося в зоне влияния перегораживающего сооружения; h_2 – глубина перед перегораживающим сооружением, устанавливаемая из условия пропуска максимального расхода; h – глубина перед перегораживающим сооружением, устанавливаемая из условия пропуска транзитного расхода; i – уклон канала

Рисунок 2 – Кривые свободной поверхности воды при автоматизации регулированием по нижнему бьефу

При этом способе регулирования между бьефами старшего канала имеется не только прямая, но и обратная гидравлическая связь через подпоры, создаваемые перегораживающими сооружениями.

Всякое нарушение или изменение установившегося режима работы нижерасположенного бьефа вызывает немедленную перестройку работы всех вышерасположенных регулирующих сооружений, включая и головные, на другой, отвечающим новым условиям, режим. В случае увеличения водопотребления каким-либо хозяйством перегораживающее сооружение, расположенное выше по течению от этого отвода, автоматически срабатывает (открывается) и не дает понизиться уровню воды в своем нижнем бьефе. При этом понижается уровень воды в вышерасположенном бьефе, и в свою очередь открывается перегораживающее сооружение, стабилизирующее уровень в этом бьефе (рисунок 2). Таким образом, возмущение, возникшее в одном бьефе, распространяется вверх по течению и приводит к последовательной перестройке работы всех вышерасположен-

ных перегораживающих сооружений, а также головного сооружения и завершается подачей в систему дополнительного расхода воды в соответствии с требованиями водопользователей.

При снижении потребности в воде, наоборот, последовательно прикрываются перегораживающие сооружения снизу доверху. В результате через головное сооружение в систему будет поступать меньший расход.

Вторая особенность регулирования по нижнему бьефу – наличие постоянного резерва воды, распределенного в бьефах старшего канала таким образом, что вдоль старшего канала образуется цепочка (каскад) последовательно расположенных и примыкающих друг к другу бьефов, имеющих прямую и обратную гидравлическую связь. Поэтому этот способ регулирования называют также способом каскадного регулирования.

В процессе работы системы объемы резервных емкостей достигают максимума при транзитном расходе $Q=0$ и полностью срабатываются при $Q=Q_{\max}$. Накопление воды в резервах происходит в течение времени, необходимого для перестройки системы на новый режим в связи с уменьшением водопотребления. До тех пор пока возмущение от снижения отбора воды в какой-либо части системы не достигнет головного сооружения, в систему будет поступать расход, соответствующий ранее установившемуся режиму (больше, чем требуется в новых условиях). При этом во всех бьефах, расположенных выше места возмущения, повышается уровень, а следовательно, увеличиваются резервные объемы. Таким образом, поступающий в систему в период регулирования избыточный расход не сбрасывается, а идет на создание резервов в самой системе [1].

Способ автоматизации регулирования по нижнему бьефу имеет свои недостатки:

- возникновение опасности опорожнения канала в его головной части с потерей командования в случае нарушения плана водопользования и дефицита воды в источнике орошения;
- увеличение объема строительных работ по мере увеличения укло-

нов канала, т. к. при малых транзитных расходах старший канал имеет максимальное наполнение, и кривые свободной поверхности воды в бьефах при этом близки к горизонтальному положению; гребни бровок канала и дамб должны быть горизонтальными на протяжении каждого бьефа;

- необходимость в установке автоматических водосбросных сооружений для предотвращения перелива воды через бровки канала и в случае аварии.

Расстояния между перегораживающими сооружениями при автоматизации регулированием по нижнему бьефу определяется исходя из условий:

- минимального объема резервных емкостей в бьефах, необходимого для обеспечения водой одновременно включающихся потребителей;

- допустимого колебания уровня воды Δh в створе наиболее удаленного от перегораживающего сооружения водовыпуска, при котором обеспечивается командование и подача в младший канал плановых расходов с необходимой точностью;

- оптимальной по технико-экономическим расчетам длины горизонтальных бровок канала и дамб на протяжении бьефов.

При данном способе автоматизации необходимо также учитывать динамические переходные явления, сопровождающие процесс регулирования (прямые и обратные волны при изменении водопотребления, воздействие их на канал и сооружения, время переходного процесса и др.).

П. И. Коваленко и Л. М. Ильиной [3] предложены номограммы, значительно облегчающие расчеты минимальной допустимой длины бьефов при автоматизации регулированием по нижнему бьефу. В основу их построения положено условие обеспечения водой одновременно включающихся потребителей за счет воды в объеме регулирования бьефа и с учетом времени, необходимого для добегания волны возмущения от наиболее удаленного водопотребителя до перегораживающего сооружения и поступления затребованного расхода воды из вышерасположенного бьефа. Данными авторами построены аналогичные номограммы для определения оп-

тимальной длины бьефов на основе технико-экономических расчетов капитальных вложений на строительство горизонтальных дамб и перегораживающих сооружений.

По данным проектных разработок (80-е годы прошлого столетия) Средазгипроводхлопка, Укргипроводхоза, УкрНИИГиМ [1] и др. применение способа автоматизации регулированием по нижнему бьефу на открытых каналах экономически оправдано при уклонах $i \leq 0,0003$. При больших уклонах целесообразны закрытые самотечно-напорные системы с промежуточными бассейнами, оборудованными автоматическими регуляторами уровня нижнего бьефа в конце каждого участка трубопровода.

Смешанное регулирование представляет регулирование по нижнему бьефу, дополненное ограничениями колебаний максимальных и минимальных уровней в верхних бьефах перегораживающих сооружений.

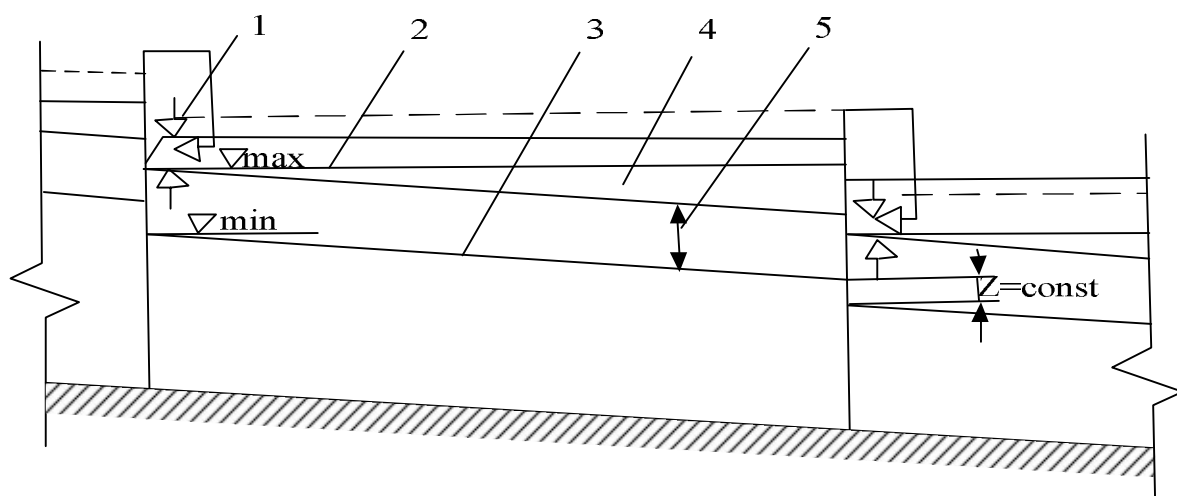
При смешанном регулировании перегораживающие сооружения при нормальном режиме работы регулируют по нижнем бьефу, а при нарушении его – автоматически поддерживают допустимые h_{\max} или h_{\min} .

Система смешанного регулирования, в отличие от регулирования по нижнему бьефу, обладает повышенной надежностью в эксплуатации, но имеет более сложную и дорогую конструкцию.

При способе автоматизации водораспределения регулированием перепада уровней воды осуществляется автоматическая стабилизация постоянных гидравлических перепадов на каждом перегораживающем сооружении, колебания уровней воды верхнего и нижнего бьефов ограничены заданными максимальными и минимальными их значениями (рисунок 3) [1].

При режимах водопотребления, когда уровни воды в верхних и нижних бьефах не выходят за пределы допустимых, перегораживающие сооружения автоматически поддерживают заданные постоянные перепады. С повышением уровней в нижних бьефах до максимальных значений, перегораживающие сооружения автоматически переключаются на стабилизацию уровня нижнего бьефа и, наоборот, с достижением в верхних бьефах

максимальных или минимальных заданных отметок, перегораживающее сооружение стабилизирует уже только уровень верхнего бьефа, предотвращая переполнение или опорожнение канала.



1 – регулятор постоянных перепадов; 2 – свободная поверхность воды при $Q=0$;
3 – свободная поверхность воды при $Q_{расч}=0$; 4 – объем регулирования; 5 – резервный
объем регулирования

Рисунок 3 – Схема автоматизации водораспределения регулированием перепада уровней воды

Достоинство данного способа регулирования заключается в увеличении по сравнению с другими способами резервных объемов воды, образующихся в периоды, когда водопотребление меньше расчетного. Его целесообразно применять на магистральных каналах и его ветвях при машинном водозаборе и необходимости суточного регулирования без устройства регулирующих бассейнов.

Способ автоматизации водораспределения регулированием объема (расхода) воды разделяется на регулирование с перетекающими объемами и регулирование непосредственным отбором расходов.

При регулировании с перетекающими объемами осуществляется баланс притока и расходования воды на любом участке канала с помощью автоматических перегораживающих сооружений, поддерживающих изменение уровней воды в конце и начале бьефов в заданной зависимости (рисунок 4) [1]. Кривые свободной поверхности воды как бы зафиксированы по концам и пересекаются в створе, удаленном от вышерасположенно-

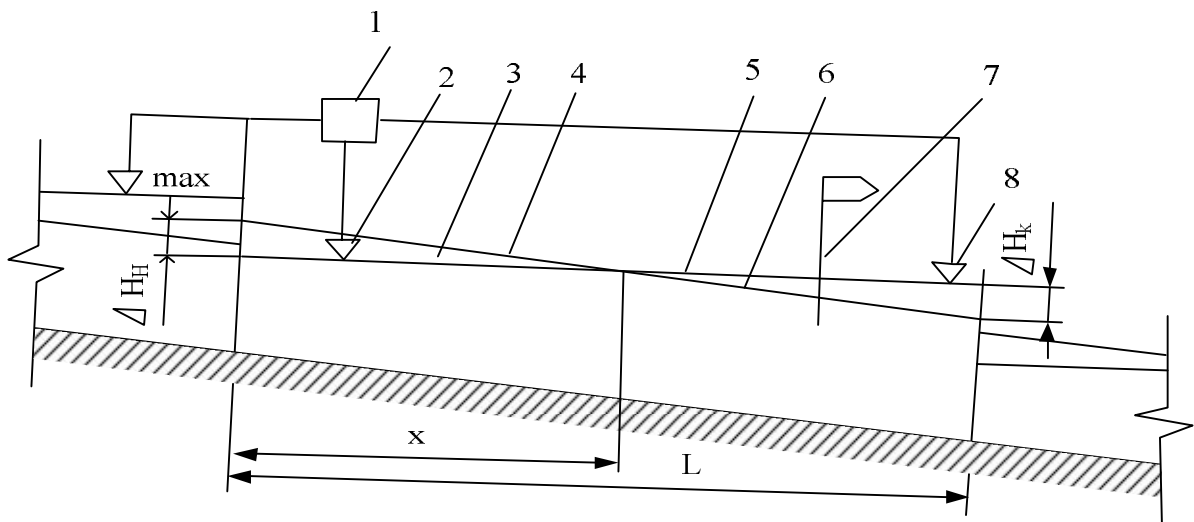
го перегораживающего сооружения на расстоянии x , определяемое по следующей формуле [1]:

$$x = \frac{\Delta H_n l}{\Delta H_n + \Delta H_k}, \text{ м}, \quad (2)$$

где ΔH_n – максимально допустимое уменьшение уровня в начале бьефа, м;

l – длина бьефа, м;

ΔH_k – максимально допустимое увеличение уровня в конце бьефа, м.



1 – регулятор уровня воды; 2 – датчик уровня воды в начале бьефа; 3 – перетекающий объем; 4 – свободная поверхность воды при $Q_{\text{расч}}$; 5 – свободная поверхность воды при $Q=0$; 6 – объем регулирования; 7 – водовыпуск; 8 – датчик уровня в конце бьефа; x – расстояние до пересечения кривых свободной поверхности; L – длина бьефа

Рисунок 4 – Схема автоматического регулирования с перетекающими объемами

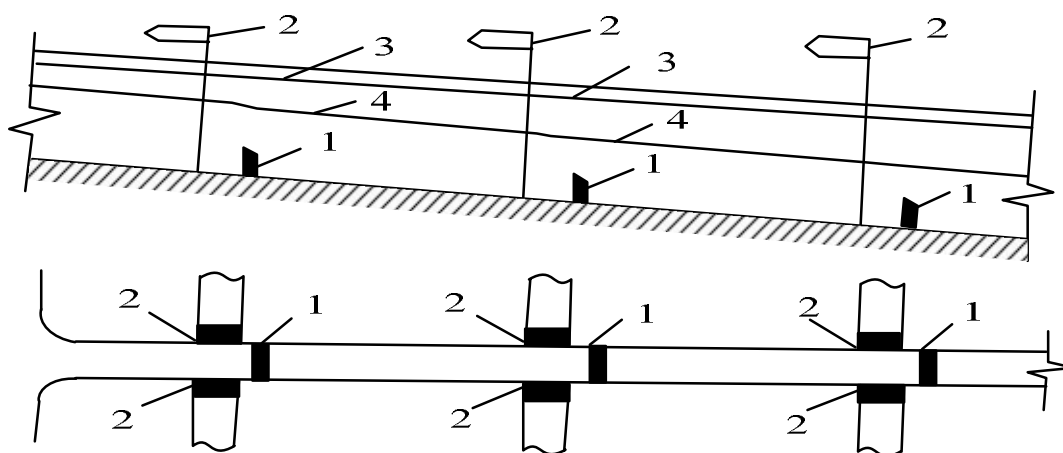
Уровни воды в бьефах колеблются между свободной поверхностью (при максимальном расходе) и горизонтальной (при $Q=0$). Водопотребителей размещают во второй части бьефов в пределах распространения регулирующих объемов.

К достоинствам регулирования с перетекающими объемами можно отнести сокращение времени передачи возмущений от сооружения к сооружению и инертности системы в переходном процессе. В результате уменьшаются регулирующие объемы и, соответственно, уменьшаются глубины каналов и их строительная стоимость.

К недостаткам данного способа можно отнести:

- размещение водовыпусков в основном во второй части бьефов;
- возможность возникновения технологических сбросов;
- повышенная сложность и стоимость автоматических перегораживающих сооружений.

При регулировании непосредственным отбором расходов канал старшего порядка устраивается сквозным без перегораживающих сооружений или со стабилизаторами уровня в виде невысоких водосливов, стабилизирующих камер, стеснения русел, а отводы оборудуются автоматическими устройствами, позволяющими подавать постоянные заданные расходы независимо от колебаний уровня в старшем канале (рисунок 5) [1]. В систему подается расход, равный сумме расходов потребителей, а вода распределяется в строгом соответствии с планом водопользования (нормированное водораспределение) [1].



- 1 – водоподпорные сооружения водосливного типа; 2 – авторегуляторы или стабилизаторы расхода; 3 – свободная поверхность воды при Q_{\max} ;
4 – свободная поверхность воды при Q_{\min}

Рисунок 5 – Схема автоматизации водораспределения непосредственным отбором расходов

Способ регулирования непосредственным отбором расходов наиболее экономичен, по сравнению с остальными, так как не требует на строительство дорогостоящих перегораживающих сооружений. Основное условие его применение – обеспеченность командования уровня воды старшего канала над уровнями в младших во всем диапазоне изменения плановых расходов водопотребления. Недостатки данного способа аналогичны недостаткам ав-

томатизации водораспределения регулированием по верхнему бьефу.

Водораспределение на закрытых оросительных системах осуществляется преимущественно регулированием «сверху вниз» и «снизу вверх». Возможно также смешанное регулирование, т. е. различное сочетание основных способов.

Автоматизация регулированием «сверху вниз» аналогична регулированию по верхнему бьефу в открытых каналах, когда в систему подается определенное количество (расход) воды, которое централизованно распределяется в соответствии с планом водопользования. Централизованное водораспределение регулированием «сверху вниз» применяется преимущественно на низконапорных системах с водовыпусками в оросительную сеть для поверхностного полива или полива дождевальными машинами, оборудованными средствами дополнительной подкачки воды.

Автоматическое водораспределение регулированием «снизу вверх» подобно регулированию по нижнему бьефу на открытых системах и основано на использовании в напорных трубопроводах обратной гидравлической связи, что позволяет немедленно удовлетворять запросы потребителей воды по типу водопроводной системы. При регулировании водораспределения «снизу вверх» обязателен централизованный диспетчерский контроль за работой всех сооружений и системы в целом в заданных режимах.

Закрытые напорные оросительные системы позволяют полностью автоматизировать процесс водоподдачи, водораспределения и полива, однако они требуют применения дефицитных стальных труб и больших капитальных затрат [1].

3 Способы управления и схемы регулирования процессов водораспределения на оросительной системе

В настоящее время в результате разработок и исследований ученых [6, 7, 13] определились два основных способа управления водораспределением: централизованное и децентрализованное.

Централизованное управление предполагает контроль, анализ и выработку управляющих решений в одном центре в соответствии с единым критерием качества функционирования оросительной системы в целом. Оно характеризуется применением централизованной автоматики, требует надежных линий связи и быстродействующих устройств дистанционного управления.

Децентрализованное управление базируется на принципах субоптимизации отдельных технологических звеньев оросительной системы в соответствии с частными критериями. Данная структура управления водораспределением реализуется при относительно невысокой надежности линий связи и характеризуется широким применением локальных систем управления, работающих в автономном режиме. Децентрализованное управление предусматривает использование обратной (гидравлической или электрической) связи в сети каналов и трубопроводов с проведением централизованного контроля [13].

Основные критерии применимости централизованного и децентрализованного способов управления – размер орошаемой площади оросительной системы и степень разветвленности сети каналов. Конкретные значения критериальных показателей зависят от надежности и дальности действия линий связи, быстродействия средств управления и контроля, инерционности объекта управления и др. Выявление и научное обоснование рациональных вариантов сочетания различных способов управления является предметом дальнейших исследований [13].

Любая система управления зависит от принятой на ней схемы регулирования, которая, как правило, определяет всю технологию управления технологическим процессом, а также накладывает ряд требований и ограничений. В мелиорации и орошаемом земледелии от нее во многом зависят конфигурация оросительной сети, размеры каналов, размещение и состав гидротехнических сооружений, средств управления, контроля и связи,

а также величина технологических и идущих на сброс расходов, командные уровни в бьефах, режимы движения воды.

Схемы автоматического регулирования воды на оросительных системах достаточно полно описаны в трудах Я. В. Бочкарева, П. И. Коваленко, А. Л. Ильмера [1, 3, 12], а также в ряде других работ и нормативных документов [9, 14-16].

Так, по исследованиям П. И. Коваленко [3], установлено, что сложный гидравлический режим в канале необходимо увязывать с режимом работы автоматических устройств гидротехнических сооружений, используя во многих случаях гидравлическую связь между ними. При отсутствии гидравлической связи по уровням воды в каналах или трубопроводах возможно использование обратной электрической связи. Конструктивные особенности применяемых схем автоматического регулирования на мелиоративных системах зависят от рельефных условий или, точнее, от уклонов канала. На основе этого была создана классификация схем автоматического регулирования на мелиоративных системах, где за основу был принят принцип работы с учетом увязки режимов автоматических регуляторов.

В соответствии с классификацией [3], схемы регулирования воды в оросительных каналах были разделены на два класса, которые и определяли основные пути развития и совершенствования систем управления водораспределением.

К первому классу были отнесены схемы, характеризующиеся отсутствием обратной гидравлической связи и осуществлением нормированного водораспределения «сверху вниз» (от головного водозабора к потребителям). Такое регулирование водораспределением принято считать «по плану». К ним относят регулирование по верхнему бьефу, регулирование непосредственным отбором расходов, пропорциональное регулирование.

Ко второму классу отнесены схемы, характеризующиеся наличием обратной гидравлической или других видов связи и осуществлением регулирования водораспределением «снизу вверх» (от потребителей к голов-

ному водозабору). Это способы регулирования «по требованию». К ним относят регулирование по нижнему бьефу, смешанное регулирование, регулирование поддержанием постоянных перепадов, регулирование с протекающими объемами, регулирование с перекрестными связями, регулирование по расходу и напору в трубопроводах.

Более широкое развитие получили схемы регулирования второго класса, так как они обеспечивали более рациональное использование водных ресурсов. Однако они требовали больших затрат на строительство и эксплуатацию.

К достоинствам регулирования по верхнему бьефу можно отнести надежное и точное водораспределение в соответствии с планом водопользования; простота эксплуатации, обусловленная лишь редкими корректировками установок регуляторов; обеспечение защиты каналов от переливов через бровки; минимальные затраты на строительство; наличие простых, надежных и дешевых регуляторов верхнего бьефа. К недостаткам – невозможность автоматического управления водозабором из-за отсутствия гидравлической обратной связи; возникновение дефицита у нижерасположенных потребителей при увеличении потребности у вышерасположенных потребителей и, наоборот, образование непроизводительных сбросов при их отказе; большая продолжительность переходных процессов при изменении расходов [9].

К достоинствам регулирования по нижнему бьефу относятся: обеспечение автоматического водораспределения по запросу в пределах расчетных расходов; быстрое обеспечение запросов потребителей; отсутствие непроизводительных сбросов. К недостаткам – увеличение затрат на строительство в связи с увеличением уклонов каналов; поддержание высоких уровней воды в каналах при минимальных расходах; необходимость устройства в каждом бьефе аварийных сбросов; возникновение дефицита у вышерасположенных водопотребителей при заборах, превышающих расчетные; отсутствие средств ограничения водопотребления.

Схема смешанного регулирования практически соединяет достоинства схем регулирования по верхнему и по нижнему бьефу и, частично, недостатки, позволяя устранить необходимость устройства в каждом бьефе аварийных сбросов. Но она требует дополнительных затрат на обеспечение высоконадежного регулятора смешанного регулирования.

Регулирование поддержанием постоянных перепадов, обеспечивая возможность использования потребителями каждого бьефа резервных объемов всех бьефов каналов, вместе с тем требует дополнительных затрат на создание этих объемов.

Регулирование с перетекающими объемами и регулирование с перекрестными связями позволяют уменьшить необходимые объемы регулирования и, следовательно, размеры каналов и их стоимость. Но они требуют затрат на электрооборудование, устройство силовых и информационных линий связи между бьефами каналов и т. д. [9].

В зависимости от вида сети, способа полива и местных условий рекомендуются схемы регулирования [3, 17], приведенные в таблице 2.

Таблица 2 – Схемы регулирования в зависимости от способов полива, местных условий, типа и конструкции водовода

Способ полива, местные условия	Тип и конструкция водоводов	Рекомендуемая схема регулирования
1	2	3
Постоянная внутрихозяйственная сеть		
1 Полив по бороздам и полосам		
Уклоны меньше критических	Каналы, лотки	По верхнему бьефу
Уклоны больше критических	Самонапорные трубопроводы	В напорных трубопроводах
	Безнапорные трубопроводы	По верхнему бьефу. Непосредственным отбором расходов
	Каналы, лотки	Непосредственным отбором расходов
2 Полив дождевальными машинами		
Независимо от уклонов	Напорные трубопроводы	В напорных трубопроводах
Уклоны больше критических	Самонапорные трубопроводы	В напорных трубопроводах. По нижнему бьефу на трубопроводах
Средние уклоны поверхности земли по трассе канала (менее 0,001)	Каналы	Каскадное регулирование по нижнему бьефу. Смешанное регулирование

Продолжение таблицы 2

1	2	3
3 Полив затоплением на рисовых системах		
	Каналы	Каскадное регулирование по нижнему бьефу
Межхозяйственная сеть		
1 Полив по бороздам и полосам		
Уклоны меньше критических	Каналы	По верхнему бьефу
Средние уклоны поверхности земли по трассе канала (менее 0,0005)	Каналы	Каскадное регулирование (по нижнему бьефу, смешанное регулирование, постоянными перепадами)
2 Полив дождевальными машинами и затоплением на рисовых системах		
Средние уклоны поверхности земли по трассе канала (менее 0,001)	Каналы	Каскадное регулирование (по нижнему бьефу, смешанное регулирование, постоянными перепадами)
Средние уклоны поверхности земли по трассе канала (менее 0,002)	Каналы	Каскадное регулирование с протекающими объемами
Средние уклоны поверхности земли по трассе канала (более 0,002).	Каналы	По верхнему бьефу
Уклоны меньше критических	Каналы	По верхнему бьефу

Ученые А. М. Жарковский и М. Ш. Марголин [18] выделяют еще одно направление совершенствования систем управления процессами водораспределения – комбинированные системы. В них предприняты попытки совместить достоинства и недостатки первого и второго направления. К наиболее перспективным они относят схемы с бассейнами перерегулирования и системы динамического регулирования.

Схемы с бассейнами регулирования основываются на соединении схем регулирования «по плану» и «по требованию» с помощью бассейнов краткосрочного перерегулирования, располагаемых на границе схем. В зависимости от объема бассейна перерегулирования магистральная сеть с головной и подкачивающими насосными станциями может работать постоянным среднесуточным или декадным расходом, что резко улучшает условия эксплуатации.

Подобное решение практически не требует остродефицитных материалов, оборудования и средств автоматизации.

Системы динамического регулирования обеспечивают централизованное управление водораспределением «по требованию». Управление водораспределением осуществляется с центрального диспетчерского пункта, оборудованного управляющей ЭВМ. Большинство гидротехнических сооружений автоматизируется и снабжается водоизмерительными приборами. Для обеспечения сбора данных и дистанционного управления система оборудуется системой телемеханики. Бьефы каналов должны иметь резервные емкости, величина которых значительно меньше, чем для любой из схем регулирования «по требованию».

В настоящее время накопленный опыт в научных исследованиях оросительных систем позволил авторам [19] сделать вывод о том, что для межхозяйственной сети каналов преобладающими факторами являются уклоны, способы транспортирования воды и водозабора и используемый вид обратной связи (гидравлический или электрический). Исходя из этого, все схемы автоматического регулирования водораспределения на оросительной системе предлагается разделить на три класса (рисунок 6).

К первому классу отнесены схемы регулирования для каналов с уклонами больше критических, отсутствием обратной гидравлической связи (используется электрическая обратная связь) и нормированным водораспределением сверху вниз (от головного водозабора к потребителям).

Ко второму классу отнесены схемы регулирования для каналов со средними уклонами, короткими бьефами и эффективной обратной гидравлической связью, при полном или частичном отсутствии обратной гидравлической связи (например, внутрихозяйственная сеть каналов), с ненормированным или смешанным водораспределением «снизу вверх».

К третьему классу отнесены схемы регулирования для каналов с малыми уклонами, нефиксированными длинными бьефами, наличием электрической обратной связи и малоэффективной обратной гидравлической связью (например, межхозяйственная сеть каналов равнинной зоны), с не-

нормированным водораспределением «снизу вверх» от потребителя к головному водозабору [19].

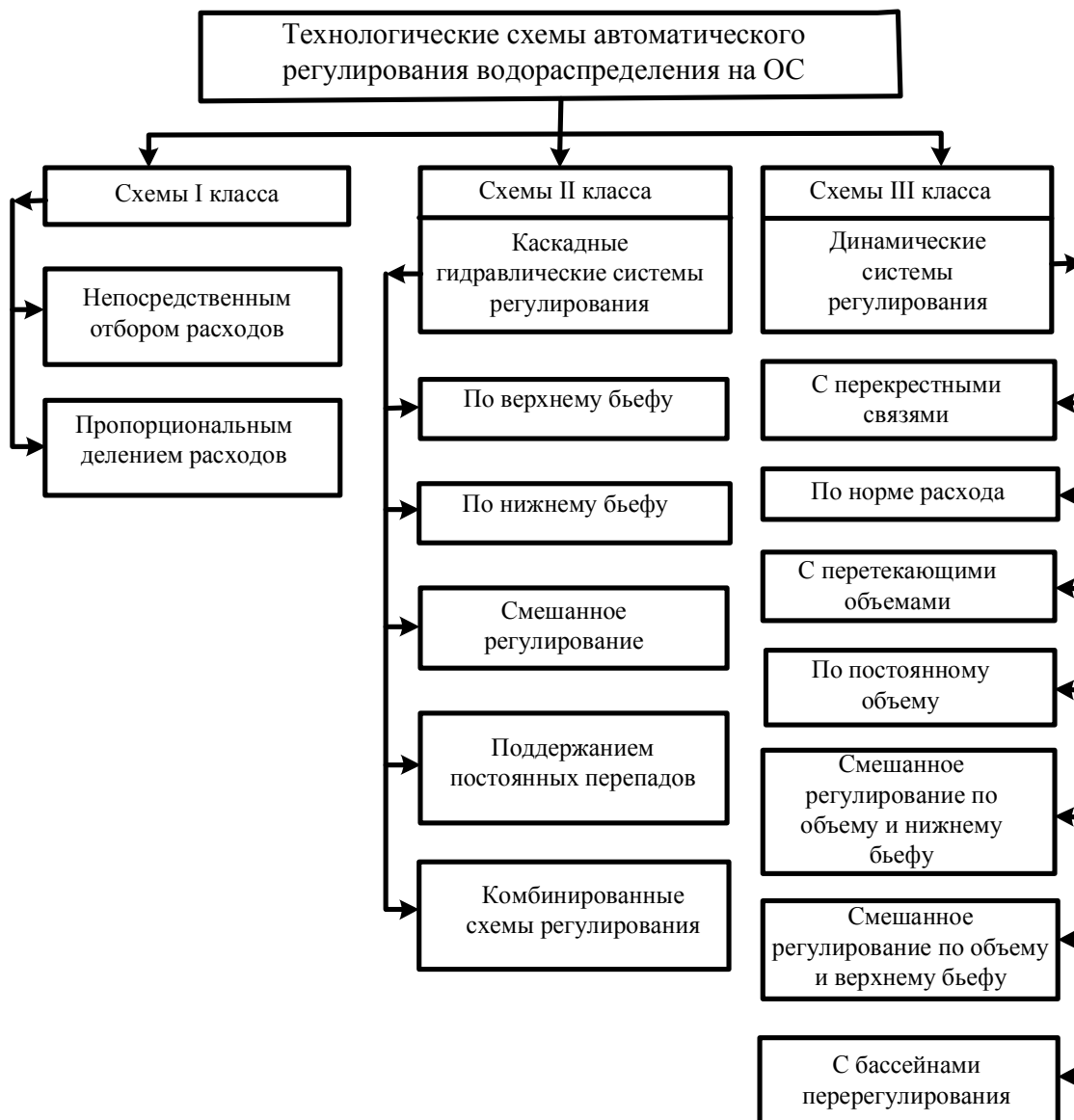


Рисунок 6 – Классификация схем автоматического регулирования водораспределения на оросительных системах

Наиболее совершенны в техническом отношении и перспективны для применения на оросительной системе равнинной зоны считаются схемы регулирования третьего класса.

4 Информационные и математические средства обеспечения при автоматизации оросительных систем

Проблема автоматизации водораспределения должна решаться комплексно с учетом динамических процессов течения воды в системе откры-

тых каналов оросительной сети. Данные динамические процессы являются следствием постоянной смены режимов работы оросительной системы, происходящих при изменении количества потребителей оросительной воды из системы, изменении производительности потребления, изменении погодных условий, при аварийных ситуациях и многих других факторов. Все эти процессы могут происходить в достаточно короткие промежутки времени и оказывать значительное влияние на работу всей системы в целом. В связи с этим решение задачи управления оросительными системами должно включать построение математических моделей динамических процессов течения воды в каналах [20].

Средства математического описания объекта управления должны быть представлены в виде математических моделей, описывающих поведение процессов, происходящих в системе. В зависимости от предъявляемых к ним требований они могут обеспечивать также возможность имитационного моделирования или обеспечивать достаточную точность расчетов параметров.

Математическая модель представляет собой систему математических соотношений, описывающих изучаемый процесс или явление. Процесс составления математической модели называется математическим моделированием. Как и другие виды моделей, математическая модель представляет задачу в упрощенном виде и описывает только те свойства и закономерности, которые наиболее важны для данного объекта или процесса. Математическая модель позволяет осуществлять многосторонний количественный анализ. Изменяя исходные данные, критерии, граничные условия, каждый раз можно получить оптимальное для заданных условий решение и определить дальнейшее направление поиска [21].

Имитационное моделирование представляет собой процесс конструирования модели реальной системы и постановки экспериментов на этой модели с целью либо понять поведение системы, либо оценить (в рамках ограничений, накладываемых некоторым критерием или совокупностью

критериев) различные стратегии (сценарии), обеспечивающие функционирование данной системы. В отличие от традиционного аналитического моделирования принцип имитационного моделирования основывается на том, что математическая модель воспроизводит процесс функционирования во времени, причем имитируются события, протекающие в системе с сохранением логики их взаимодействия [21].

Для создания имитационной модели речной (канальной) системы необходимо знать гидравлику, численные методы, используемые в вычислительной гидравлике, дифференциальное и интегральное исчисления, программирование, принципы обработки данных.

4.1 Использование методов расчета неустановившегося движения воды

При проектировании автоматизированных систем на оросительной сети необходимо учитывать частое маневрирование затворами гидротехнических сооружений, что обуславливает возникновение в бьефах каналов неустановившегося движения.

В настоящее время существует большое количество методов расчета неустановившегося движения воды в каналах с автоматическим регулированием, в которых применяют зависимости для неустановившегося плавно изменяющегося движения воды в открытых руслах [3, 4]. Ученый М. С. Грушевский [22] разделяет их на строгие и упрощенные.

Строгие методы (их еще называют детальными, гидравлическими или гидродинамическими) основываются на численном решении одномерной системы уравнений Сен-Венана. Термин является условным, т. к. уравнения выведены при определенных допущениях и решение не является точным.

Упрощенные методы не основаны непосредственно на решении одномерной системы уравнений (их еще называют инженерными). Уравнения Сен-Венана заменяются каким-нибудь другим выражением, например,

связью между расходом и объемом воды на расчетном (характерном) участке. Несмотря на возможности использования ЭВМ для расчета строгими методами, упрощенные методы могут использоваться при определенных условиях (для решения определенных задач), например, при отсутствии полной информации для расчета.

Промежуточное положение занимают методы, основанные на численном интегрировании неполных уравнений Сен-Венана (диффузионная волна, кинематическая волна).

Выбор метода расчета для данной конкретной задачи зависит от ряда обстоятельств: поставленной задачи, требований к точности ее решения, специфики объекта, имеющейся исходной информации, ее надежности и точности, возможностей организации, наличия соответствующих ЭВМ, количества и квалификации исполнителей и т. п.

Математическое моделирование неустановившегося режима потока основано на разработке и решении математических зависимостей, реализующих известные законы гидравлики. Исходной системой дифференциальных уравнений неустановившегося течения воды, как уже было упомянуто выше, является система уравнений Сен-Венана, хорошо описывающая динамические процессы течения воды в длинных призматических руслах [6, 16, 22]:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \alpha V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g \left(i - \frac{V^2}{C^2 R} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial h}{\partial t} = 0,$$

где V – средняя скорость течения воды, м/с;

α – коэффициент неравномерного распределения скорости по поперечному сечению потока;

x – длина, м;

g – ускорение силы тяжести, м/с²;

h – глубина водотока, м;

i – уклон дна водотока;

C – коэффициент Шези, $\text{м}^{0,5}/\text{с}$;

R – гидравлический радиус, м ;

Q – расход, $\text{м}^3/\text{с}$;

B – ширина русла по урезу воды, м ;

t – время, с .

Уравнения Сен-Венана представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа. Отыскание их точных аналитических решений представляет собой большие математические трудности.

Усилиями ученых разработаны приближенные решения, которые с теми или иными допущениями удовлетворяют требования инженерной практики расчетов. Уравнения Сен-Венана выведены с учетом следующих упрощающих предпосылок [16]:

- скорости постоянны в пределах каждого сечения потока;
- для учета неравномерного распределения скоростей по сечению потока вводится корректив (коэффициент неравномерного распределения скорости по поперечному сечению потока);
- давление в потоке подчиняется гидростатическому закону;
- влияние турбулентного перемешивания воды и трения о стенки русла учитывается введением силы сопротивления с помощью известного соотношения Шези;
- течение воды подчиняется условию плавной изменяемости по длине.

Задача расчета неустановившегося движения формуруется следующим образом. По известным характеристикам русла или участка канала находится решение системы уравнений, удовлетворяющее начальным и граничным условиям, конкретизирующим постановку и решение определенной задачи.

4.2 Использование методов моделирования при решении задачи оперативного управления водораспределением

Моделирование поведения объекта или системы является неотъемлемой частью современной теории управления, т. к. оно позволяет оценить поведение объекта в различных условиях его функционирования и выбрать наиболее приемлемые с точки зрения управления решения.

При этом, как правило, средства моделирования могут использоваться как на стадии их проектирования, так и непосредственно в контуре управления этими объектами или процессами. Во втором случае средства моделирования являются частью алгоритма управления и поэтому должны быть достаточно мобильными, обладать хорошим быстродействием, учитывать особенности конкретной оросительной системы, быть достаточно простыми в эксплуатации [23].

Основу моделирования процессов управления водораспределением на оросительных системах составляет имитация процессов движения воды в каналах оросительной системы. Одновременно с этим возникает необходимость в оценке поведения системы в условиях действия на ней различного рода возмущающих и управляющих воздействий, работы регулирующих и гидротехнических сооружений, особенностей поведения водопользователей и т. п. Это означает, что возникает потребность включения в моделируемый процесс этих элементов, описания алгоритмов и особенностей их работы. Очевидно, что все это значительно ужесточает требования к мобильности моделирующих средств, модульности ее построения, возможности адаптации на условия и особенности функционирования каждой конкретной системы. Исходя из этого, состав задач, решаемых с помощью средств имитационного моделирования процессов управления водораспределением на открытых оросительных системах, может быть сформулирован следующим образом [23-27]:

- расчет и построение кривых свободных поверхностей движения воды в открытых каналах при установившихся режимах движения воды;

- назначение типоразмеров и параметров оросительной системы и ее звеньев;
- проверка пропускной способности каналов с учетом возможных динамических процессов;
- определение времен добегания возмущений в зависимости от различных факторов;
- определение времен добегания расходов до конкретных потребителей и выявление их зависимости от условий эксплуатации сооружений на оросительной системе или ее участке;
- выявление аварийных и нештатных ситуаций на системе в процессе водораспределения;
- выбор схемы регулирования водораспределения на оросительной системе и т. д.

Кроме этого для моделирования процессов управления водораспределением на оросительной системе комплекс должен обеспечивать:

- возможность настройки на конкретную конфигурацию оросительной системы;
- имитацию нанесения управляющих и возмущающих воздействий;
- обеспечение адекватности модели процессам, протекающим на системе;
- обеспечение удобного интерфейса пользователя;
- представление информации в агрегированном, удобном для анализа и принятия решений виде.

Вопрос определения способов математического описания процессов движения воды в каналах системы составляет основу для имитационного моделирования.

4.3 Требования к системе автоматизированного управления водораспределением

При создании системы автоматизированного управления водорас-

пределением необходимо учитывать комплекс технических требований, которые можно объединить в следующие основные группы [1, 28-30]:

- требования, связанные со статическими и динамическими свойствами системы автоматизированного управления водораспределением. Особое место в этой группе занимают показатели, которые оценивают работу системы в различных режимах. К ним относятся обеспечение устойчивости, точностные характеристики, определяющие ошибки, которые возникают в системе при различных режимах;

- требования, связанные с характером эксплуатации системы автоматизированного управления водораспределением, например условия обслуживания системы, возможность ремонта или периодичность проверок и др.;

- требования, связанные с надежностью работы системы и ее устойчивостью к влиянию климатических, механических и других воздействий, например безотказность работы, ресурс, интервал рабочих температур, интервал влажности и запыленности, вибростойкость;

- требования, связанные с технологичностью изготовления системы автоматизированного управления водораспределением, например использование унифицированных или освоенных элементов и узлов, новых прогрессивных материалов, простота изготовления и монтажа и т. п.;

- требования, определяющие допустимую массу и потребляемую мощность, используемый источник энергии, габариты системы автоматизированного управления водораспределением, экономичность системы и т. п.;

- требования, связанные с общей ситуацией, имеющей место при проектировании, особенно при создании новой системы автоматизированного управления водораспределением, например патентная чистота, имеющиеся научные, конструкторские заделы и др.

4.4 Объекты регулирования, их параметры и основные свойства

Регулирование является составной частью управления процессом водораспределения на оросительных системах. С учетом этого оросительные системы оснащают системой автоматического регулирования, обеспечивающей стабилизацию выходных параметров (уровни, расходы воды, давление в трубопроводах и т. д.). Система автоматического регулирования представляет собой взаимодействие объекта регулирования и автоматического устройства.

К объектам регулирования на оросительных системах относят управляемые гидротехнические сооружения и гидромеханические установки (водозаборные узлы, головные регуляторы, водораспределительные сооружения, сооружения для очистки воды, водоводы, насосные станции и установки и др.), в которых требуется управлять уровнем, расходом воды, давлением в трубопроводах и т. д. [1].

Каждый объект характеризуется определенными параметрами. Для водораспределительного сооружения основные параметры – наполнение, расход, скорость движения воды и т. д. Параметры объекта делят на количественные и качественные [1, 28-30].

При автоматизации объектов в большинстве случаев требуется, чтобы режим системы автоматизированного управлением водораспределением характеризовался минимальным числом переменных величин (по возможности только одной), например расход воды в отводе – в функции напора в верхнем бьефе. Другие взаимно связанные переменные могут при этом задаваться определенной величиной, например для рассматриваемого случая – площадью отверстия.

Режим системы автоматизированного управлением водораспределением определяется тремя основными факторами [1, 29]: внешним воздействием V_v , воздействием управления V_y и показателем внутреннего состояния H . Так в перегораживающем сооружении внешним воздействием

будет изменение расхода в регулируемом бьефе, управляемым – воздействие авторегулятора на регулируемую среду и показателем внутреннего состояния – уровень воды в регулируемом бьефе. Разность воздействий $\Delta B = B_y - B_b$, нарушающую равновесие режима объекта, называют возмущающим воздействием.

Участок системы между местами приложения воздействий B_y и B_b , из которых одно условно считается входным, а другое выходным, называют регулируемым участком или объектом регулирования. Например, для регулятора уровня воды в резервуаре объектом регулирования будет участок, включающий резервуар и трубопровод.

Объекты регулирования обладают свойствами, существенно влияющими на весь процесс регулирования, и предъявляют определенные требования к регуляторам. Основные свойства объектов регулирования – аккумулирующая способность, самовыравнивание, время разгона и постоянная времени объекта, запаздывание.

Аккумулирующая способность. Технологический процесс в любом объекте регулирования связан с притоком, расходом, накоплением и преобразованием вещества или энергии. Так, любой объект до пуска его в работу должен быть приведен в работоспособное состояние. Канал для приведения в работоспособное состояние должен быть соответственно наполнен водой до определенного уровня или давления и т. д. Следовательно, для приведения в работоспособное состояние объекта и поддержания его в процессе работы должно быть затрачено некоторое количество энергии или вещества, которое остается в системе и после того, как она начинает работать [1, 29].

Это свойство объекта вбирать в себя определенное количество энергии или вещества называют аккумулирующей способностью или емкостью. Физическая сущность ее для различных объектов оценивается различными величинами. Так для канала, трубопровода, водохранилища, гидротехнического сооружения и других сооружений аккумулирующая спо-

способность – это в буквальном смысле емкость, так как емкость этих объектов вбирает в себя воду до приведения объекта в работоспособное состояние и поддержания его в этом состоянии.

От размера емкости существенно зависит скорость изменения регулируемой величины: чем меньше емкость, тем больше скорость изменения регулируемой величины при возникновении возмущения в объекте и наоборот. Например, чем больше емкость водохранилища, тем медленнее будет изменяться уровень воды в нем при данном расходе наполнения. Следовательно, большая емкость предъявляет меньшие требования к скорости регулирования и облегчает задачу авторегулятора и наоборот. Объекты по емкостям делят на безъемкостные, одноемкостные и многоемкостные.

Объекты могут иметь сосредоточенные и рассредоточенные параметры. В первом случае объект обладает ограниченным числом параллельно и последовательно включенных емкостей и описывается обычно несколькими уравнениями (не менее числа емкостей). Во втором случае объект имеет большое число взаимосвязанных рассредоточенных емкостей и требует для описания процесса нескольких систем управлений, так как процессы, протекающие в таких объектах, зависят от нескольких переменных параметров.

Процесс регулирования в общем случае может быть представлен балансом регулируемой среды в объекте [1, 28-30]:

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4)$$

где ΔQ – накопление регулируемой среды в объекте в единицу времени, представляющее собой возмущающее воздействие, $\text{м}^3/\text{с}$;

Q_1 – приток этой среды в единицу времени, $\text{м}^3/\text{с}$;

Q_2 – расход среды в единицу времени, $\text{м}^3/\text{с}$.

Если $Q_1 > Q_2$, то есть $\Delta Q > 0$, то запас регулируемой среды в объекте увеличивается, при $\Delta Q < 0$ – уменьшается; при $\Delta Q = 0$ запас среды

не изменяется. От величины ΔQ зависит скорость изменения регулируемой величины.

Для упрощения дальнейших выводов переходят к безразмерным величинам, для чего все члены уравнения (4) относят к базисному значению расхода регулируемой среды Q_6 , который в практике обычно принимают равным максимально возможному для данного объекта расходу, чтобы в расчетах его значение не влияло на знаки величин, входящих в уравнение. В общем случае может быть принято любое значение.

В безразмерных величинах уравнение (4) примет вид [1, 28-30]:

$$\Delta q = q_1 - q_2. \quad (5)$$

Обозначенная теперь в безразмерных величинах произвольная регулируемая величина r по аналогии с вышеизложенным будет равна отношению:

$$r = R / R_6, \quad (6)$$

где R – произвольная регулируемая величина;

R_6 – базисное значение регулируемой величины, значение которой задается так же, как и Q_6 .

Выше отмечалось, что скорость изменения регулируемой величины зависит от воздействия возмущения ΔQ или в безразмерных величинах Δq . В общем случае (в безразмерных величинах) эта зависимость выразится как функция времени [1, 28-30]:

$$dr/dt = \varphi(\Delta q). \quad (7)$$

В практике большинство случаев функциональную зависимость принимают линейной, тогда

$$dr/dt = \sigma \Delta q, \quad (8)$$

где σ – коэффициент пропорциональности, характеризующий изменение регулируемой величины без воздействия регулятора на объект при относительном возмущении (отклонении) $\Delta q = 1$.

Коэффициент σ отражает чувствительность объекта к возмущению,

поэтому его называют еще коэффициентом чувствительности или чувствительностью объекта к возмущению.

В тех случаях, когда функцию $\varphi(\Delta q)$ нельзя выразить линейной зависимостью (например, в водохранилищах или каналах, где объем с наполнением изменяется нелинейно), для определения скорости изменения регулируемой величины надо знать изменение значения Δ в функции Δq . В этих случаях при анализе объектов обычно всю емкость делят на элементарные емкости, в пределах которых можно пренебречь нелинейностью, когда возможно выразить $\sigma = f(\Delta q)$.

Чтобы установить чувствительность объекта к возмущению (величину коэффициента σ), определяют коэффициент емкости. Под коэффициентом емкости c понимают отношение объема емкости W к регулируемой величине R [1, 28-30]:

$$c = W / R. \quad (9)$$

Коэффициент c в зависимости от формы и размеров емкости может быть постоянной (объем емкости объекта W с наполнением изменяется линейно) и переменной величиной (объем емкости W с наполнением изменяется нелинейно). В последнем случае c выразится как отношение изменения емкости к соответствующему изменению регулируемой величины:

$$c = \Delta W / \Delta R, \quad (10)$$

где ΔW принимают в пределах, позволяющих пренебречь нелинейным изменением объема емкости с наполнением ее.

Например, объект регулирования – резервуар, регулируемая величина – уровень (наполнение H). Площадь поперечного сечения резервуара по высоте для упрощения выводов принимается постоянной. Обозначим начальное наполнение резервуара H_0 , начальный приток Q_0 . При $Q_1 = Q_2$ уровень воды в резервуаре будет постоянным, и предположим, что он равен H_0 . При нарушении баланса ($Q_1 \neq Q_2$) уровень изменяется, это изменение во времени t выразится уравнением [1, 28-30]:

$$H - H_0 = \frac{(Q_1 - Q_2)t}{\Omega}, \text{ м}, \quad (11)$$

где Ω – площадь резервуара, м^2 .

Коэффициент емкости [1, 28-30]:

$$c = W/R = (H\Omega)/H = \Omega. \quad (12)$$

Скорость изменения регулируемой величины равна [1]:

$$dR/dt = (H - H_0)/t = (Q_1 - Q_2)/\Omega$$

или в безразмерных величинах

$$dr/dt = (\Delta q Q_6)/(\Omega R_6). \quad (13)$$

Из выражения (9) и (13) следует, что чувствительность объекта к возмущению:

$$\sigma = Q_6/(\Omega R_6), \text{ с}^{-1}. \quad (14)$$

Чем больше площадь резервуара Ω или, другими словами, чем больше коэффициент емкости объекта c , тем меньше чувствительность объекта к возмущению.

Самовыравнивание. Самовыравнивание – свойство объекта регулирования самостоятельно (без регулятора) выравнивать нарушенный баланс между притоком и расходом регулируемой среды. В этом случае регулируемая величина в новом равновесном состоянии приобретает новое значение.

Самовыравнивание может быть количественно оценено величиной, называемой степенью или коэффициентом самовыравнивания Θ , который равен отношению относительного возмущения $d\Delta q$ к изменению относительной регулируемой величины dr [1, 28-30]:

$$\Theta = d\Delta q/dr. \quad (15)$$

При $\Theta = 0$ самовыравнивания не происходит, регулируемая величина R будет неограниченно возрастать.

При $\Theta > 0$ (положительное самовыравнивание) регулируемая величина R стремится к новому установившемуся значению.

При $\Theta < 0$ (отрицательное самовыравнивание) регулируемая величина R неограниченно уменьшается и может стать отрицательной.

Самовыравнивание объекта существенно влияет на работу авторегулятора. Так положительное самовыравнивание облегчает задачу авторегулятора, и при значительном самовыравнивании можно вообще не применять его. При отсутствии же самовыравнивания невозможно поддерживать заданное значение регулируемой величины без авторегулятора.

В качестве объекта с самовыравниванием можно рассматривать резервуар со свободным истечением, наполняющийся водой, при этом задвижка на выпуске имеет какое-то постоянное открытие.

В качестве объекта, не обладающего способностью к самовыравниванию, можно привести тот же резервуар, в который поступает вода, но откачивается насосом с постоянной подачей независимо от притока. Здесь с уменьшением или увеличением притока уровень воды в резервуаре будет непрерывно изменяться.

Величину, обратную степени самовыравнивания, называют коэффициентом усиления объекта [1, 28-30]:

$$k = 1/\Theta . \quad (16)$$

Если обозначить установившееся состояние выходной величиной объекта в общем случае через $x_{\text{вых}}$, входной – $x_{\text{вх}}$, то

$$k = x_{\text{вых}} / x_{\text{вх}} , \quad (17)$$

откуда

$$x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}} . \quad (18)$$

Следовательно, коэффициент усиления k показывает, во сколько раз изменяется величина объекта по отношению к входной при переходе от одного установившегося состояния к другому.

Время разгона и постоянная времени объекта. В объектах с самовыравниванием, обладающих емкостью и, следовательно, инерцией, на переход к новому установившемуся состоянию при появлении возмущения затрачивается некоторое время, которое может быть значительным.

В практике ограничиваются временем, когда регулируемая величина достигает 99 % своего нового значения при возмущении, равном единице.

Время, в течение которого регулируемая величина изменяется от нуля до установившегося значения при мгновенном изменении притока вещества или энергии от нуля до номинального значения, называют временем разгона объекта T_p . Временем разгона принято называть продолжительность процесса самовыравнивания при начальном возмущающем воздействии, равном единице, то есть тогда, когда величина максимального возмущения равна базисному значению, в течение которого регулируемая величина изменяется от 0 до $1/n$ части своего номинального значения. Кривая $r(t)$ показывает изменение относительной регулируемой величины в процессе самовыравнивания при возмущающем воздействии, равном единице [1, 28-30].

Наряду со временем разгона T_p в динамике регулирования, важное значение имеет постоянная времени объекта T_a – время разгона, когда самовыравнивания не происходит, то есть время, в течение которого регулируемая величина достигает установившегося значения при мгновенном изменении притока вещества или энергии от нуля до номинального значения. Время можно определить графически. Для этого необходимо провести через начало координат касательную к кривой $r(t)$ до пересечения с прямой номинального значения r_n . Отрезок, отсекаемый на этой прямой, и определяет искомую постоянную времени объекта.

Кривая $r(t)$ представляет собой экспоненту r_n и описывается уравнением [1]:

$$r = r_n (1 - e^{-t/T_a}). \quad (19)$$

При $t = T_a$, то есть за время, равное одной постоянной времени объекта, регулируемая величина r достигает 0,623 своего установившегося значения:

$$r = r_n (1 - e^{-1}) = r_n (1 - 0,368) = 0,632 r_n. \quad (20)$$

Для достижения $r = r_n$ требуется бесконечно большое время разгона. В практике принимают $T_p = 4-5 T_a$, при этом ошибка в регулируемой величине будет не более 1,8-0,7 %.

На объектах, не обладающих самовыравниванием, время разгона совпадает с постоянной времени объекта T_a .

Если известна чувствительность объекта к возмущению σ , то T_a легко определяют по формуле [1, 25, 26]:

$$T_a = 1/\sigma. \quad (21)$$

В объектах с большей емкостью постоянная времени велика, так как $\sigma = Q_0 / \Omega R_0$ ничтожно мала. Такие объекты, как уже отмечалось выше, предъявляют меньше требования к быстродействию системы регулирования.

Время разгона и постоянную времени объекта можно определить опытным путем. Для этого необходимо на изучаемом объекте с помощью мерных приборов снять изменения регулируемой величины во времени при внезапном изменении нагрузки и построить кривую изменения регулируемой величины в функции времени. Значение регулируемой величины, установившееся в результате процесса самовыравнивания, называют потенциальной регулируемой величиной.

Запаздывание. При рассмотрении времени разгона и постоянной времени объекта предполагалось, что в объекте после возникновения возмущения немедленно начинает изменяться регулируемая величина. Практически изменение регулируемой величины после нарушения равновесия всегда происходит с некоторым запаздыванием, которое отрицательно сказывается на процессе регулирования.

Различают переходное и передаточное запаздывания.

Переходное запаздывание τ_n характерно для двухъёмкостных и многоёмкостных объектов, оно обусловлено гидравлическими, электрическими или тепловыми сопротивлениями между отдельными объектами и равно времени прохождения вещества или энергии через ёмкости до регуля-

тора. Отсюда следует, что величина переходного запаздывания зависит от конструкции объекта и условий эксплуатации. Больше того, переходное запаздывание может увеличиваться в процессе эксплуатации объекта. Например, заиливание каналов, трубопроводов уменьшает сечение, а, следовательно, увеличивает переходное запаздывание.

С передаточным запаздыванием τ_0 мы встречаемся преимущественно в регулируемых системах, использующих усилители (например, гидравлические автоматы непрямого действия).

Передаточное запаздывание оказывает вредное влияние на процесс регулирования, так как способствует увеличению отклонений регулируемой величины. Общее запаздывание τ равно сумме переходного и передаточного запаздываний [28-30]:

$$\tau = \tau_n + \tau_0. \quad (22)$$

При проектировании автоматических систем стремятся к уменьшению запаздывания как переходного, так и передаточного.

4.5 Создание математических моделей объекта

Под математической моделью понимают уравнение динамики объекта, представляющее собой математическое описание процесса, протекающего в нем [1].

При автоматическом регулировании применяют различные способы составления уравнений динамики, составление математических моделей или, другими словами, уравнений объектов регулирования:

- уравнение динамики или математическую модель объекта составляют на основе анализа физических процессов, которые могут происходить в объекте регулирования. Так, например, в оросительных каналах как объектах регулирования физический процесс – движение воды описывается дифференциальными уравнениями неустановившегося движения (уравнение Сен-Венана). Моделью объекта здесь будет решение уравнения Сен-Венана [7, 16, 22];

- модель объекта составляют с помощью экспериментально определенных статистических характеристик объекта, представленных в виде графиков;

- модель объекта составляют на основе табличных данных процесса, протекающего в объекте, полученных также экспериментальным путем с последующей их обработкой методами регрессивного анализа;

- при составлении модели объекта используют аналоговое или цифровое моделирование.

Порядок уравнений динамики объектов зависит от сложности процессов, протекающих в них, и от принятых допущений.

Математические модели объектов регулирования или уравнения динамики записывают в виде дифференциальных уравнений или разностных уравнений различных порядков в линеаризованном виде или с разделенными линейными и нелинейными частями. Нелинейная часть объекта обычно представляет собой статические характеристики, а линейная – динамические.

Параметры математических моделей часто (особенно это характерно для мелиоративных объектов) не известны, и для их определения проводят исследования, в результате которых получают табличные данные или графики процесса, протекающего в объекте. Параметры объекта в этом случае вычисляют с помощью регрессивного анализа.

Создание и использование математических моделей требует от разработчиков кроме знания формально-логических методов, тщательного анализа изучаемого объекта с целью правильного и строгого формулирования основных идей и закономерностей, а также с целью выявления достаточного объема достоверных фактических, статистических и нормативных данных.

Заключение

В заключении необходимо отметить, что вопросы управления процессами водораспределения на оросительных системах актуальны и в настоящее время. Сведение потерь оросительной воды к минимуму, обеспечение соответствия объемов водозабора и водопотребления возможно при условии существенного повышения качества управления процессами водораспределения путем автоматизации сооружений оросительной системы.

В результате разработок и исследований учеными определились два основных способа управления водораспределением: централизованное и децентрализованное. Основные критерии применимости централизованного и децентрализованного способов управления – размер орошаемой площади оросительной системы и степень разветвленности сети каналов.

Накопленный опыт проектирования и эксплуатации оросительных систем показывает, что при выборе схем автоматического регулирования водораспределения для межхозяйственной сети каналов основными факторами являются уклоны, способы транспортирования воды и водозабора из них, используемый вид обратной связи. Наиболее совершенными в техническом отношении и перспективны для применения на оросительной сети равнинной зоны схемы регулирования третьего класса для каналов с малыми уклонами, нефиксированными длинными бьефами, наличием электрической обратной связи и малоэффективной обратной гидравлической связью, с ненормированным водораспределением «снизу-вверх» от потребителя к головному водозабору.

Проблема автоматизации водораспределения должна решаться комплексно с учетом динамических процессов течения воды в системе открытых каналов оросительной сети. Данные динамические процессы являются следствием постоянной смены режимов работы оросительной системы, происходящих при изменении количества потребителей оросительной воды из системы, изменении производительности потребления, изменении погодных условий, при аварийных ситуациях и многих других факторов.

Одновременно с этим возникает необходимость в оценке поведения системы в условиях действия на ней различного рода возмущающих и управляющих воздействий, работы регулирующих и гидротехнических сооружений, особенностей поведения водопользователей и т. п. Это означает, что возникает потребность в моделировании процесса включающего особенности системы.

Основу моделирования процессов управления водораспределением на оросительных системах составляет имитация процессов движения воды в каналах оросительной системы.

Реализация динамического управления процессами водораспределения требует соответствующего информационного и математического обеспечения. Качество динамического управления во многом зависит от совершенства математических моделей, сложность составления которых определяется многофакторностью процесса водораспределения.

Список использованной литературы

1 Бочкарев, Я. В. Основы автоматики и автоматизации производственных процессов в гидромелиорации: учеб. для вузов / Я. В. Бочкарев, Е. Е. Овчаров. – М.: Колос, 1981. – 335 с.

2 Ганкин, М. З. Автоматизация и телемеханизация производственных процессов / М. З. Ганкин. – М.: Колос, 1977. – 336 с.

3 Коваленко, П. И. Автоматизация мелиоративных систем / П. И. Коваленко. – М.: Колос, 1983. – 304 с.

4 Бочкарев, В. Я. Новые технологии и средства измерений, методы организации водоучета на оросительных системах / В. Я. Бочкарев; ФГБНУ «РосНИИПМ». – Новочеркасск, 2012. – 227 с. – Деп. в ВИНТИ 27.04.12, № 196-B2012.

5 Маковский, Э. Э. Автоматизированные автономные системы трансформации неравномерного стока / Э. Э. Маковский, В. В. Волчкова. – Фрунзе: Илим, 1981. – 380 с.

6 Натальчук, М. Ф. Эксплуатация гидромелиоративных систем / М. Ф. Натальчук, В. И. Ольгаренко, В. А. Сурин. – М.: Колос, 1995. – 320 с.

7 Системные принципы водоучета и управления водораспределением на оросительной сети / В. Н. Щедрин [и др.]. – Новочеркасск.: Новочерк. гос. техн. ун-т, 1994. – 235 с.

8 Щедрин, В. Н. Повышение эффективности управления водораспределением и совершенствование конструкций открытых оросительных систем: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 06.01.02 / Щедрин Вячеслав Николаевич. – Москва, 1995. – 56 с.

9 Коржов, В. И. Совершенствование технологических приемов и средств управления водораспределением в открытых оросительных системах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02 / Коржов Виктор Иванович. – Новочеркасск, 1994. – 20 с.

10 Щедрин, В. Н. Совершенствование технологии управления водораспределением на открытых оросительных системах / В. Н. Щедрин,

В. И. Коржов. – М.: ЦНТИ «Мелиоводинформ», 1995. – 80 с.

11 Водоучет и водораспределение на мелиоративных системах: науч. обзор / В. Я. Бочкарев, А. А. Чураев, И. В. Клишин, Л. В. Юченко, М. В. Вайнберг; ФГНУ «РосНИИПМ». – Новочеркасск, 2011. – 43 с. – Деп. в ВИНТИ 28.06.11, № 309-В2011.

12 Бочкарев, Я. В. Эксплуатационная гидрометрия и автоматизация оросительных систем / Я. В. Бочкарев. – М.: Агропромиздат, 1987. – 175 с.

13 Щедрин, В. Н. Совершенствование конструкций открытых оросительных систем и управления водораспределением / В. Н. Щедрин. – М.: Мелиорация и водное хозяйство, 1998. – 160 с.

14 Ткачев, А. А. Переходные гидравлические процессы в магистральных каналах оросительных систем для условий динамического регулирования водораспределения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.16 / Ткачев Александр Александрович. – Новочеркасск, 2000. – 25 с.

15 ГОСТ 34.601-90 Автоматизированные системы. Стадии создания. – Введ. 1992-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 7 с.

16 Временное руководство по проектированию и эксплуатации автоматизированных оросительных систем / В. Н. Щедрин [и др.]. – В 2 ч. – Ч. I. – Новочеркасск: Югмелиорация, 1989. – 160 с.

17 Мелиорация и водное хозяйство. Орошение: справочник / под ред. Б. Б. Шумакова. – М.: Колос, 1999. – 432 с.

18 Жарковский, А. М. Каналы саморегулирующиеся с бассейнами перерегулирования расхода для реконструируемых и новых оросительных систем / А. М. Жарковский, М. Ш. Марголин // Реконструкция и техническое перевооружение мелиоративных систем: сб. науч. тр. / Союзводпроект. – М., 1986. – С. 39-49.

19 Оросительные системы России: от поколения к поколению: монография / В. Н. Щедрин, А. В. Колганов, С. М. Васильев, А. А. Чураев. – В 2 ч. – Ч. 2. – Новочеркасск: Геликон, 2013. – 307 с.

20 Красовский, М. Ю. Совершенствование способов и технических

средств автоматизации водораспределения в открытых оросительных системах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02 / Красовский Михаил Юрьевич. – Новочеркасск, 1987. – 22 с.

21 Компьютерное моделирование речных потоков. Теоретические основы // Научная консалтинговая фирма «Волга». – М., 2013. – 79 с.

22 Грушевский, М. С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах / М. С. Грушевский. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 288 с.

23 Иваненко, Ю. Г. Теоретические принципы и решения специальных задач гидравлики открытых водотоков / Ю. Г. Иваненко, А. А. Ткачев. – Новочеркасск, НГМА, 2001. – 203 с.

24 Пропускная способность русел каналов и рек [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://elib.rshu.ru/files/img-216094155.pdf>, 2014.

25 Методы и расчеты неустановившегося движения в условиях дельт больших рек [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/metody-i-raschety-neustanovivshegosya-dvizheniya-v-usloviyakh-delt-bolshikh-rek>, 2014.

26 Расчеты неустановившегося движения воды в реках [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/1162905>, 2014.

27 Неустановившееся движение в мелиоративной системе каналов при периодическом подпоре для условий Нижней Гвинеи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tekhnosfera.com/neustanovivsheesya-dvizhenie-v-meliorativnoy-sisteme-kanalov-pri-periodicheskom-podpore-dlya-usloviy-nizhney-gvinei>, 2014.

28 Использование методов моделирования в исследовании систем управления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://personups.ru/bilety-k-gosekzameni-po-spetsialnosti-menedzhment-organizatsii/18-ispolzovanie-metodov-modelirovaniya-v-issledovanii-stem.html>, 2014.

29 Развитие методологии расчета параметров неустановившегося течения воды при водораспределении в каналах оросительных систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/razvitie>

metodologii-rascheta-parametrov-neustanovivshegosya-techeniya-vody-pri-vodorasprede, 2014.

30 Методические указания пользователя информационно-советующей системы управления водораспределением с использованием ГИС технологий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eccs-water.net/content/view/157/12/lang,ru>, 2014.