

УДК 626.823.004:519.816.001.57

В. Н. Щедрин, А. А. Чураев, В. М. Школьная, Л. В. Юченко

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОДОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НА КАНАЛАХ ОТКРЫТОЙ ОРОСИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Целью исследований являлось построение имитационной модели динамического управления водораспределением на каналах открытой оросительной сети. Для достижения поставленной цели был использован гидрометрический метод получения расходных характеристик сетевых гидротехнических сооружений «скорость – площадь» и метод математического имитационного моделирования технологических процессов. В процессе исследований был разработан алгоритм создания имитационной математической модели, включающий восемь основных этапов: 1) построение плановой схемы оросительной сети; 2) построение продольных профилей и поперечных сечений каналов оросительной сети; 3) разбивка продольных профилей канала на расчетные участки водорегулирования; 4) определение КПД каналов оросительной сети; 5) определение значений расходов, глубин и средних скоростей движения воды по расчетным участкам; 6) определение продолжительности перерегулировки глубин на границах расчетных участков каналов сети; 7) построение теоретических и экспериментальных зависимостей продолжительности перерегулировки по расчетным участкам; 8) проведение сценарных исследований применения модели динамического управления процессами водораспределения при реализации цели оптимизации использования оросительной воды. Получены теоретические и экспериментальные зависимости скорости течения от глубины наполнения расчетных участков канала, а также суммарной продолжительности перерегулировки глубин на расчетных участках. Максимальные значения коэффициентов асимметрии и вариации теоретических и опытных данных составляют соответственно $C_S = 1,86$ ($C_S < 5$), $C_v = 0,15$ ($C_v < 3$). В результате исследований была построена имитационная модель водораспределения, которая позволяет определить суммарный головной расход в голове канала, фактический объем водоподачи, время обеспечения расходами водовыделов и количество одновременно работающих насосных агрегатов для обеспечения необходимых расходов.

Ключевые слова: оросительные системы, водораспределение, динамическое управление, модель, автоматизированные системы управления.

V. N. Shchedrin, A. A. Churayev, V. M. Shkol'naya, L. V. Yuchenko

Russian Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation

SIMULATION OF DYNAMIC MANAGEMENT OF WATER DISTRIBUTION AT CANALS OF OPEN IRRIGATION NET

The objective of the research is to develop a simulation model for dynamic management of water distribution at canals of open irrigation net. To achieve the objective, hydro-metric “velocity – area” method for discharge characteristics of net hydraulic facilities and method for math simulation of technological processes were used. During the investigation an algorithm for creating math model was developed. The algorithm includes 8 main steps:

1) construction of plan layout of irrigation net; 2) plotting of longitudinal and cross-sectional profiles of irrigation net canals; 3) splitting of canal longitudinal profiles into calculated sections of water control; 4) determination of coefficient of efficiency of irrigation net canals; 5) determination of the values of discharges, depths, and mean velocities of water movement on calculated sites; 6) determination of duration for readjustment of depths at the boundaries of calculated irrigation net sections; 7) construction of theoretical and experimental relationships of duration for readjustment on calculated sections; 8) conducting scenario studies for the model of dynamic management of water distribution processes to optimize the use of irrigation water. Theoretical and experimental relationships for velocity of flow on the depth of canal calculated sections, as well as total duration of readjustment of the depths of calculated sections were obtained. Maximal values of asymmetry parameter and variation coefficient and experiment data were $C_S = 1.86$ ($C_S < 5$), $C_v = 0.15$ ($C_v < 3$) respectively. As a result of the research, simulation model of water distribution was developed. The model enables to determine total discharge in the head of a canal, actual volume of water supply, time for providing discharges for water outlets and the quantity of simultaneously working pumping units for required discharges.

Keywords: irrigation system, water distribution, dynamic management, model, automated management systems.

Введение. Управлением водораспределением на оросительных системах занимается диспетчерская служба. Современные гидромелиоративные системы могут иметь от нескольких десятков до нескольких сотен хозяйственных водовыделов, требующих своевременной и с заданным объемом подачи оросительной воды. Оператор, находясь на диспетчерском пункте, через комплекс средств современной связи и средств дистанционного управления (при их наличии) осуществляет контроль за состоянием параметров управления (уровней, открытием и закрытием щитов, расходов), обеспечивает их оперативную оценку и с помощью исполнительных механизмов (электрифицированных задвижек, насосных станций) производит поддержание их в заданных пределах.

Как правило, в случае автоматизированной системы управления сетевыми регулирующими сооружениями диспетчер регулирует подачу воды водопользователям, а в случае отсутствия средств автоматики управление затворами регулирующих сооружений производится линейным персоналом (лицами, обслуживающими каждый конкретный участок). При определении точной потребности в расходе воды хозяйств-водопользователей диспетчер должен оценить текущую обстановку на системе и составить

оперативный план перерегулирования [1–6].

Очевидно, что при таком регулировании, которое связано с отсутствием надежных методов и средств, учитывающих влияние неустановившегося движения воды в канале, практически не принимаются во внимание динамические свойства оросительной системы, инерционность протекающих в ней процессов, время добегания расходов, перерегулировки командных уровней на водовыделах, регулирующих и перегораживающих сооружениях и т. п. По той же причине трудно обеспечить оперативность управления большим количеством территориально разбросанных субъектов. В конечном итоге это приводит к нерациональному использованию водных и технических ресурсов системы, повышенным заборам воды в систему, ее непроизводительным сбросам и даже возникновению аварийных ситуаций, связанных с возможными переливами или опорожнениями каналов [7–10].

Сведение потерь оросительной воды к минимуму, обеспечение соответствия между объемами водозабора и водопотребления возможны при условии существенного повышения качества управления процессами водораспределения путем автоматизации узловых сооружений, то есть путем внедрения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) на оросительных системах. Для этого необходима разработка алгоритма построения имитационной модели динамического управления процессами водораспределения на оросительных системах и обоснование требований к ее реализации с помощью АСУ ТП [11].

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели был использован гидрометрический метод получения расходных характеристик сетевых ГТС «скорость – площадь», а также метод математического имитационного моделирования технологических процессов.

Исследования проводились на распределительном канале Р-1 Райгородской оросительной системы в Волгоградской области.

Распределительный канал Р-1 проходит на всей протяженности

в земляном русле, подает воду хозяйствам Волгоградской области и Республики Калмыкии, пропускная способность форсированных расходов – $10,8 \text{ м}^3/\text{с}$ в голове и $7,2 \text{ м}^3/\text{с}$ в конце. Протяженность канала в пределах Волгоградской области – 60,3 км, к каналу привязаны земли регулярного орошения и лиманы площадью 2499,3 га. Оросительная система имеет гидрометрическую сеть специальных постов, градуированных сооружений, водомерных устройств и приборов, расположенных в соответствии с проектом или схемой.

Зависимость средних скоростей потока от глубины по расчетным участкам определялась экспериментально с помощью гидрометрической вертушки ГР-21М при установившемся движении потока в канале. Погрешность прибора, указанная в свидетельстве о поверке, составляла 1,5 %.

Исходными данными для моделирования в программном комплексе MIKE 11 являлись диапазоны максимальных и минимальных расходов в канале, топографические данные и геометрические размеры характерных поперечных сечений участков канала, водовыделов и других сетевых сооружений.

При построении поперечных и продольных сечений канала был использован язык программирования Microsoft Visual Basic программы Microsoft Excel в рамках формирования базы данных по расчетным участкам при моделировании в MIKE 11. Соответственно, теоретические результаты моделирования были получены с помощью программы MIKE 11 и проверены путем натурных наблюдений на действующем оросительном канале Р-1 (опыты № 1, 2, 3).

Результаты и обсуждение. В результате проведенных исследований авторами был предложен алгоритм построения имитационной модели для действующей оросительной системы, который включает следующие этапы:

- 1-й этап – построение плановой схемы оросительной сети;

- 2-й этап – построение продольных профилей и поперечных сечений каналов оросительной сети;
- 3-й этап – разбивка продольных профилей канала на расчетные участки водорегулирования;
- 4-й этап – определение КПД каналов оросительной сети;
- 5-й этап – определение значений расходов, глубин и средних скоростей движения воды по расчетным участкам;
- 6-й этап – определение продолжительности перерегулировки глубин на границах расчетных участков каналов сети;
- 7-й этап – построение теоретических и экспериментальных зависимостей продолжительности перерегулировки по расчетным участкам;
- 8-й этап – проведение сценарных исследований применения модели динамического управления процессами водораспределения при реализации цели оптимизации использования оросительной воды.

Плановая схема оросительной сети является исходным материалом для построения продольных профилей и поперечных сечений входящих в нее каналов различных порядков, количество которых определяется в зависимости от задач имитационного моделирования. Схема должна включать ситуационный план, который сформирован на картографической (инженерно-топографической) основе, взятой из проектной документации на конкретную оросительную систему, или по результатам аэрофотосъемки (спутниковых снимков).

Для проведения имитационных экспериментов построение продольных профилей следует вести согласно линейной схеме оросительной сети с увязкой их в вертикальной плоскости с одной вертикальной шкалой отметок поверхности земли и одним основанием, включающим показатели отметок поверхности земли, отметок глубины траншеи (выемки), отметок дна траншеи (канала), уклонов, расстояний, пикетов, планов.

При построении продольного профиля канала должны быть отобра-

жены линия фактической поверхности земли; продольный профиль трассы канала, на котором указаны обозначения осей водовыделов и всех линейных сооружений; геодезические знаки (реперы, пункты геодезических сетей местного значения), определяющие исходные высоты; положения минимальных уровней воды на водовыделах. На осях водовыделов и сетевых ГТС указаны отметки максимальных уровней воды и точки командования максимального уровня воды в канале.

Поперечные сечения канала строятся для всех характерных сечений при изменении геометрических параметров канала по длине с указанием пикета и основных параметров. Для одинаковых участков линейных сооружений отображается типовое поперечное сечение. На поперечном сечении отображается пикетное значение сооружения, к которому оно относится.

Для проведения экспериментов при осуществлении имитационного моделирования необходима разбивка продольного профиля канала на расчетные участки. Расчетным участком при этом является такой, для которого задается определенная закономерность изменения геометрических, гидравлических и гидрометрических характеристик по всей рассматриваемой длине канала. При разбивке следует руководствоваться следующими общими принципами:

- характерные сечения должны располагаться в местах существенного изменения ширины сечения, уклона, а также шероховатости дна и откосов канала для создания возможности интерполяции его линейных характеристик;

- в пределах участка не должно быть резкого (ступенчатого) изменения геометрических характеристик сечения, иначе рассматриваемый участок в таких местах разбивается на два участка;

- при резко выраженном неустановившемся движении в створе возмущения (например, после регулирующих или сопрягающих сооружений)

целесообразно назначать длину участков вблизи этого створа в несколько раз меньшей, чем в зонах меньшей нестационарности течения;

- на водовыделах, подпорно-регулирующих сооружениях, сбросах, в пунктах водоучета (где происходит изменение расхода канала) и местах поворотов канала обязательно назначаются границы участков;

- в характерные сечения следует включать створы, для которых имеются материалы наблюдений за уровнями и расходами воды или кривые расходов.

КПД каналов и оросительной системы являются основными показателями работы системы и ее звеньев. Значение КПД зависит от величины следующих потерь в системе:

- потерь из оросительных каналов на фильтрацию и испарение с водной поверхности;

- потерь с орошаемых полей на фильтрацию и испарение;

- эксплуатационных потерь (утечек, непроизводительных сбросов);

- технологических потерь (в зависимости от типов орошения).

Значение КПД оросительной сети KPD_{oc} определяется по зависимости:

$$KPD_{oc} = \frac{W_{пол}}{W_{вз} - W_{повт}},$$

где $W_{пол}$ – полезно используемый объем воды, $м^3$;

$W_{вз}$ – объем воды, забираемый в голове системы, $м^3$;

$W_{повт}$ – объем воды, используемый на системе повторно, $м^3$.

При создании имитационной модели гидродинамических процессов действующей оросительной сети для определения КПД сети по расчетным участкам в качестве исходных данных должны использоваться материалы отчетности по планированию водопользования на системе. Для того чтобы данные представленных материалов были приемлемыми для использования, необходима их корректировка до и после перерегулировки с учетом

времени добегания до наблюдаемых створов и изменения горизонтов в бьефах в пределах интервалов наблюдений.

Значения расходов, глубин и средних скоростей движения воды по каждому расчетному участку канала должны определяться как на основе теоретических гидравлических расчетов, исходными данными для которых являются значения геодезических, геометрических характеристик и уклонов расчетных участков, так и на основе данных гидрометрических измерений (данных градуировок сооружений на сети и участков канала).

Это требуется для уточнения параметров математической модели, производимого решением обратной задачи с определением необходимых поправочных коэффициентов (коэффициентов расхода сооружений, шероховатости линейных участков), с целью ее применения для расчета конкретной оросительной сети, канала или его участка.

В условиях рассматриваемой задачи должны быть выполнены гидравлические расчеты всех бьефов канала при установившемся и неустановившемся режиме течения воды.

При неустановившемся (нестационарном) движении воды по каналу характеристики потока в любом створе изменяются с течением времени, а в каждый момент они не одинаковы по длине участка. Неустановившееся движение наблюдается при регулировании расходов в гидроузлах и является общим случаем движения воды в каналах, а установившееся (равномерное и неравномерное) – его частным случаем. Задачей расчета неустановившегося движения является определение двух характеристик, описывающих состояние одномерного потока (расхода и глубины) как функции длины и времени. По значениям расхода и глубины могут быть определены и другие характеристики, например скорости течения.

Математическое моделирование неустановившегося режима потока основано на разработке и решении математических зависимостей, реализующих известные законы гидравлики, заложенных в работах Сен-Венана

и Буссинеска, практическое применение которых реализовано в специализированном программном комплексе моделирования гидродинамических процессов MIKE 11 [12].

При моделировании в программном комплексе MIKE 11 используются данные о максимальных и минимальных расходах в исследуемом канале, а также топографические данные продольного профиля, геометрические размеры поперечных сечений участков канала и водовыделов. Это необходимо для определения граничных условий работы программного комплекса при калибровке модели – уточнении расходных характеристик и других гидравлических параметров, которые невозможно определить на основе лишь топографических данных.

Значения глубин на водовыделах определяются по топографическим данным [6, 13, 14]:

$$h_{\text{вод}} = h_{\text{кан}} - (Z_{\text{дна(вод)}} - Z_{\text{дна(кан)}}),$$

где $h_{\text{вод}}$ – глубина воды на водовыделе, м;

$h_{\text{кан}}$ – глубина воды в канале в месте водовыдела, м;

$Z_{\text{дна(вод)}}$ – отметка дна водовыдела, м;

$Z_{\text{дна(кан)}}$ – отметка дна канала в месте водовыдела, м.

Значения расходов воды на водовыделах (Q) устанавливаются с использованием их градуировочных зависимостей $Q = f(h_{\text{вод}})$.

В результате обработки гидравлических параметров расчетных участков канала Р-1, полученных при использовании специализированного программного комплекса MIKE 11 и проведении натурных исследований, построены соответствующие графики зависимостей средней скорости потока воды от глубины наполнения расчетного участка канала $v = f(h)$ (рисунок 1).

Скорость распространения (добегания) гребня волны определяется делением расстояния между створами на разность моментов, в которые

уровень воды в створах имеет наибольшее значение. Время добегания начального возмущения есть время, в продолжение которого фронт волны возмущения проходит заданный путь между фиксированными створами в прямом или обратном направлениях (в зависимости от того, где располагается створ возмущения).

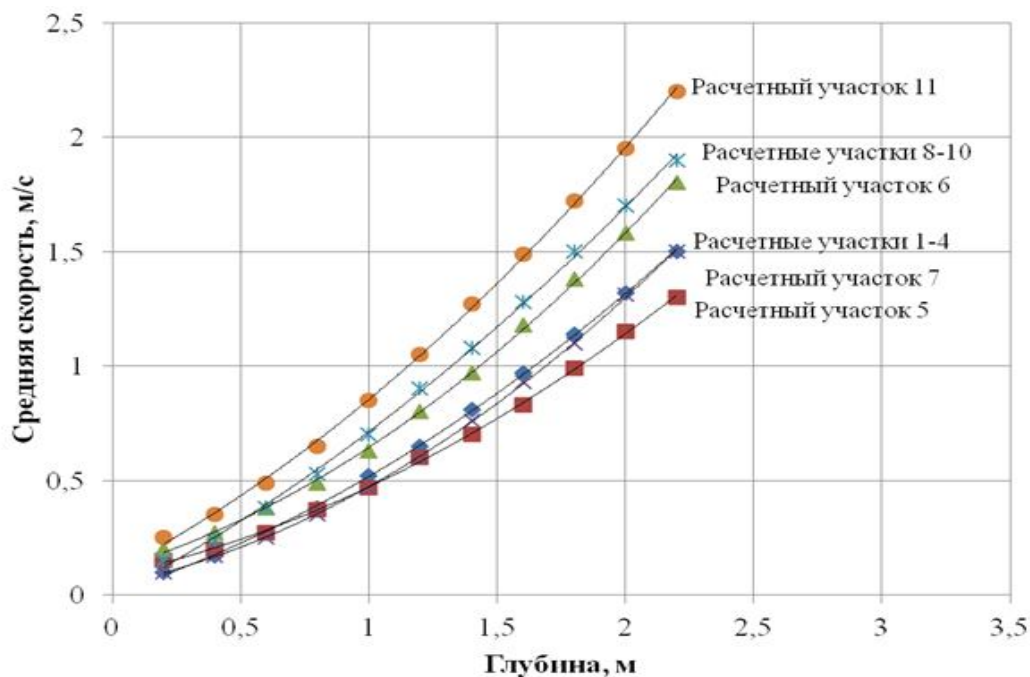


Рисунок 1 – Графики зависимостей скорости от глубины наполнения расчетных участков канала в условиях транзитного прохождения расходов

Продолжительность перерегулировки глубин ($t_{\text{пер}}$) на границах расчетного участка при создании имитационной модели складывается из времени добегания начального возмущения между створами ($t_{\text{доб}}$) и времени ($t_{\text{реж}}$), затрачиваемого на переход неустановившегося режима движения в канале в установившийся.

Как показал анализ гидравлических переходных процессов для различных режимов и условий эксплуатации открытых каналов, время добегания расхода от створа возмущения до фиксированного створа (места водотбора, перегораживающего сооружения и т. п.) зависит не только от величины начального наполнения канала, но и от качества режима течения и ве-

личины подпора, если имеет место подпорный режим течения на рассматриваемом участке. В связи с этим определение продолжительности перерегулировки по данным натурных наблюдений является обязательным.

Результаты определения суммарной продолжительности перерегулировки глубин между расчетными участками канала Р-1 программным комплексом MIKE 11, а также по данным натурных наблюдений приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Суммарная продолжительность перерегулировки глубин на расчетных участках канала Р-1 $t_{\text{пер}}$

В секундах

№ расчетного участка	Расстояние между участками, м	Глубина на расчетном участке, м							
		0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
По результатам расчетов с использованием программного комплекса MIKE 11									
1	5087,5	12220	8147	7188	4073	2444	2037	1567	1405
2	5902,5	22360	14907	13153	7453	4472	3727	2867	2570
3	859,5	46770	31180	27512	15590	9354	7795	5996	5376
4	150,5	55220	36813	32482	18407	11044	9203	7079	6347
5	11200	69340	47403	40327	24131	15550	12733	10105	8899
6	8200	80067	55541	46882	28669	19484	16105	12727	11084
7	9600	89158	62438	52438	32516	22817	18962	14950	12936
8	7200	121158	85295	68764	44823	32229	26581	21249	18305
9	2800	130158	91724	73356	48285	34876	28724	23021	19815
10	2000	133158	93866	74887	49439	35758	29438	23611	20319
11	7300	144118	101695	80479	53654	38982	32048	25769	22157
По данным натурных наблюдений (опыт 1)									
1	5087,5	12297	8224	7265	4150	2521	2114	1644	1481
2	5902,5	22452	14999	13245	7546	4564	3819	2959	2663
3	859,5	46819	31229	27561	15639	9403	7844	6045	5425
4	150,5	55269	36863	32532	18456	11093	9253	7129	6396
5	11200	69380	47443	40367	24171	15590	12773	10145	8939
6	8200	80075	55549	46890	28677	19492	16113	12735	11092
7	9600	89121	62400	52401	32478	22780	18925	14912	12899
8	7200	121254	85391	68860	44919	32325	26677	21345	18401
9	2800	130263	91828	73461	48389	34980	28828	23125	19920
10	2000	133271	93979	75000	49552	35871	29551	23724	20432
11	7300	144262	101839	80623	53798	39126	32192	25912	22301

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
По данным натурных наблюдений (опыт 2)									
1	5087,5	12125	8051	7093	3978	2349	1941	1471	1309
2	5902,5	22257	14804	13050	7350	4369	3624	2764	2467
3	859,5	46607	31017	27349	15427	9191	7632	5833	5213
4	150,5	55086	36679	32348	18273	10910	9069	6946	6213
5	11200	69163	47227	40150	23954	15374	12557	9929	8722
6	8200	79879	55353	46694	28481	19296	15917	12539	10896
7	9600	89031	62311	52311	32388	22690	18835	14822	12809
8	7200	121125	85262	68731	44790	32195	26548	21215	18272
9	2800	130098	91663	73296	48224	34815	28663	22960	19755
10	2000	133081	93789	74809	49361	35681	29361	23534	20241
11	7300	144068	101644	80428	53603	38931	31997	25718	22107
По данным натурных наблюдений (опыт 3)									
1	5087,5	12363	8290	7331	4216	2587	2180	1710	1547
2	5902,5	22524	15071	13317	7617	4636	3891	3031	2734
3	859,5	46970	31380	27711	15790	9554	7995	6196	5576
4	150,5	55392	36985	32654	18579	11216	9375	7251	6519
5	11200	69514	47577	40500	24305	15724	12907	10279	9073
6	8200	80201	55675	47016	28803	19617	16238	12861	11217
7	9600	89335	62615	52615	32692	22994	19139	15126	13113
8	7200	121137	85274	68743	44802	32208	26560	21228	18284
9	2800	130168	91733	73366	48294	34885	28733	23030	19825
10	2000	133141	93849	74870	49421	35741	29421	23594	20301
11	7300	144044	101621	80405	53580	38908	31974	25694	22083

По данным таблицы 1 строится соответствующая диаграмма продолжительности перерегулировки глубин на расчетных участках канала Р-1 нарастающим итогом (рисунок 2).

Максимальное расхождение продолжительности перерегулировки глубин на расчетных участках при сравнении теоретических (полученных с использованием программного комплекса MIKE 11) и опытных данных составило 3049 с. Коэффициенты асимметрии и вариации статистической совокупности, теоретических и опытных данных составили соответственно $C_s = 1,86$ ($C_s < 5$) и $C_v = 0,15$ ($C_v < 3$).

Графики зависимости теоретических и экспериментальных результатов определения продолжительности перерегулировки глубин для каждого расчетного створа при выбранном головном расходе канала Р-1 ($Q = 6,0 \text{ м}^3/\text{с}$) представлены на рисунке 3.

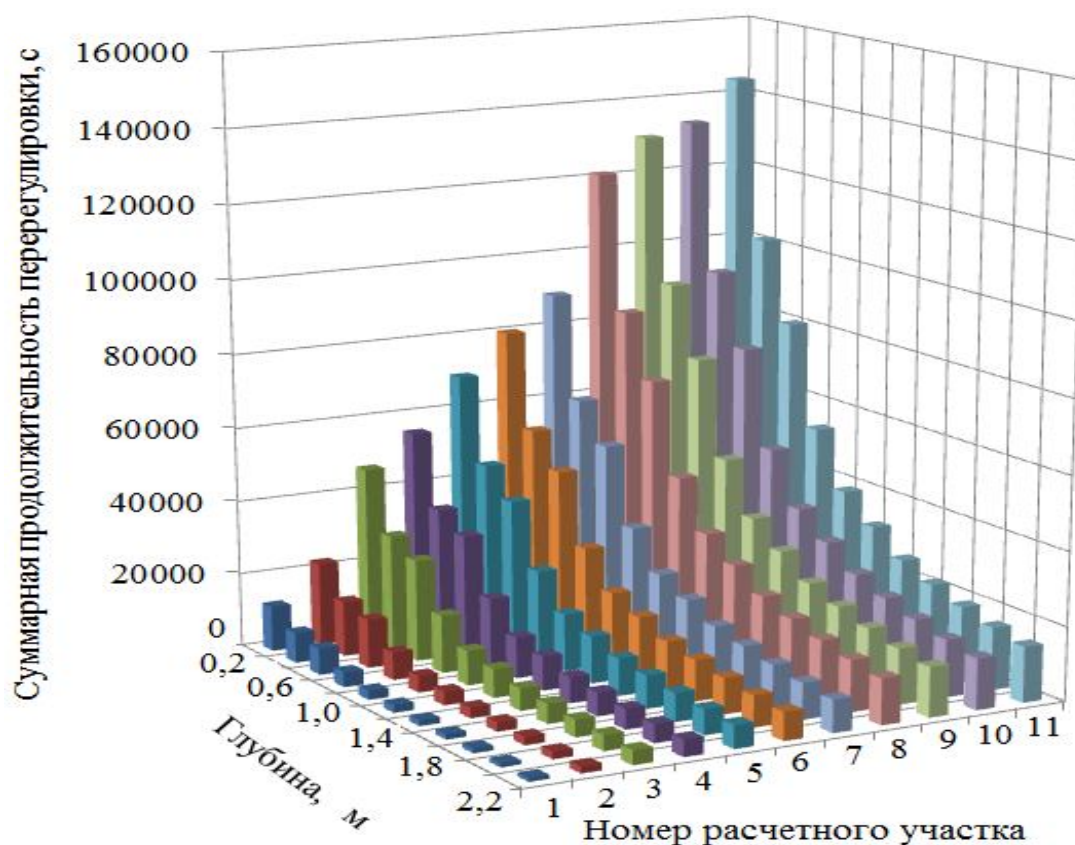


Рисунок 2 – Продолжительность перерегулировки глубин на расчетных участках канала Р-1 нарастающим итогом по результатам расчетов с использованием программного комплекса MIKE 11

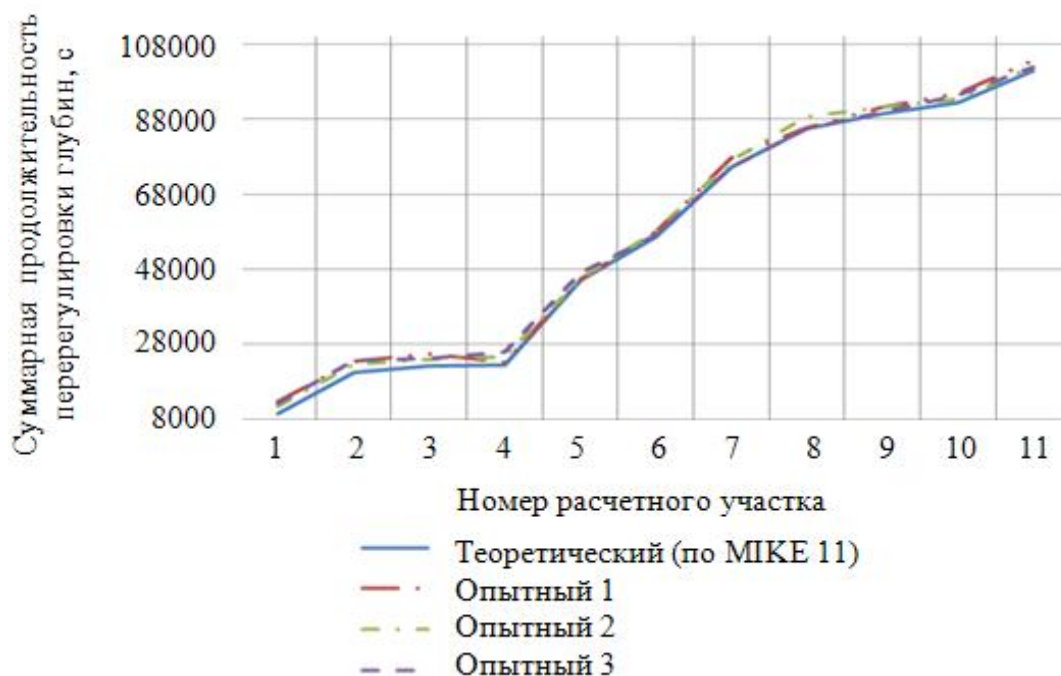


Рисунок 3 – Графики зависимости теоретических и экспериментальных результатов определения продолжительности перерегулировки глубин на расчетных участках канала Р-1 при головном расходе $Q = 6,0 \text{ м}^3/\text{с}$

Алгоритм программы реализации модели динамического управления процессами водораспределения на канале открытой оросительной сети с помощью ЭВМ приведен на рисунке 4.

Расчетные параметры, приведенные в алгоритме на рисунке 4, следующие:

- $Q_{\min}$ – минимальный расход воды в канале, $\text{м}^3/\text{с}$;
- $Q_{\max}$ – максимальный расход воды в канале, $\text{м}^3/\text{с}$;
- $Q_{\text{уч}}$ – расход воды на участке, $\text{м}^3/\text{с}$;
- $Z_{\text{дна}}$ – отметка дна канала, м;
- $Z_{h\max}$ – отметка максимального уровня воды в канале, м;
- $Z_{\text{бр}}$ – отметка бровки канала, м;
- $n_{\text{вод}}$ – количество водовыделов;
- $L_{\text{мв}}$ – расстояние между водовыделами, м;
- b – ширина канала по дну, м;
- $h_{\text{стр}}$ – строительная высота канала, м;
- $h_{\min}$ – минимальная глубина воды в канале, м;
- $h_{\max}$ – максимальная глубина воды в канале, м;
- $h_{\text{уч}}$ – глубина воды на участке, м;
- $W_{\text{пол}}$ – полезно используемый объем воды, м^3 ;
- $W_{\text{вз}}$ – объем воды, забираемый в голове системы, м^3 ;
- $W_{\text{повт}}$ – объем воды, используемый на системе повторно, м^3 ;
- $\omega_{\text{уч}}$ – площадь живого сечения участка, м^2 ;
- $t_{\text{реж}}$ – время перехода неустановившегося режима движения воды между створами в установившийся, с;
- $t_{\text{пер}}$ – продолжительность перерегулировки глубин между створами, с;

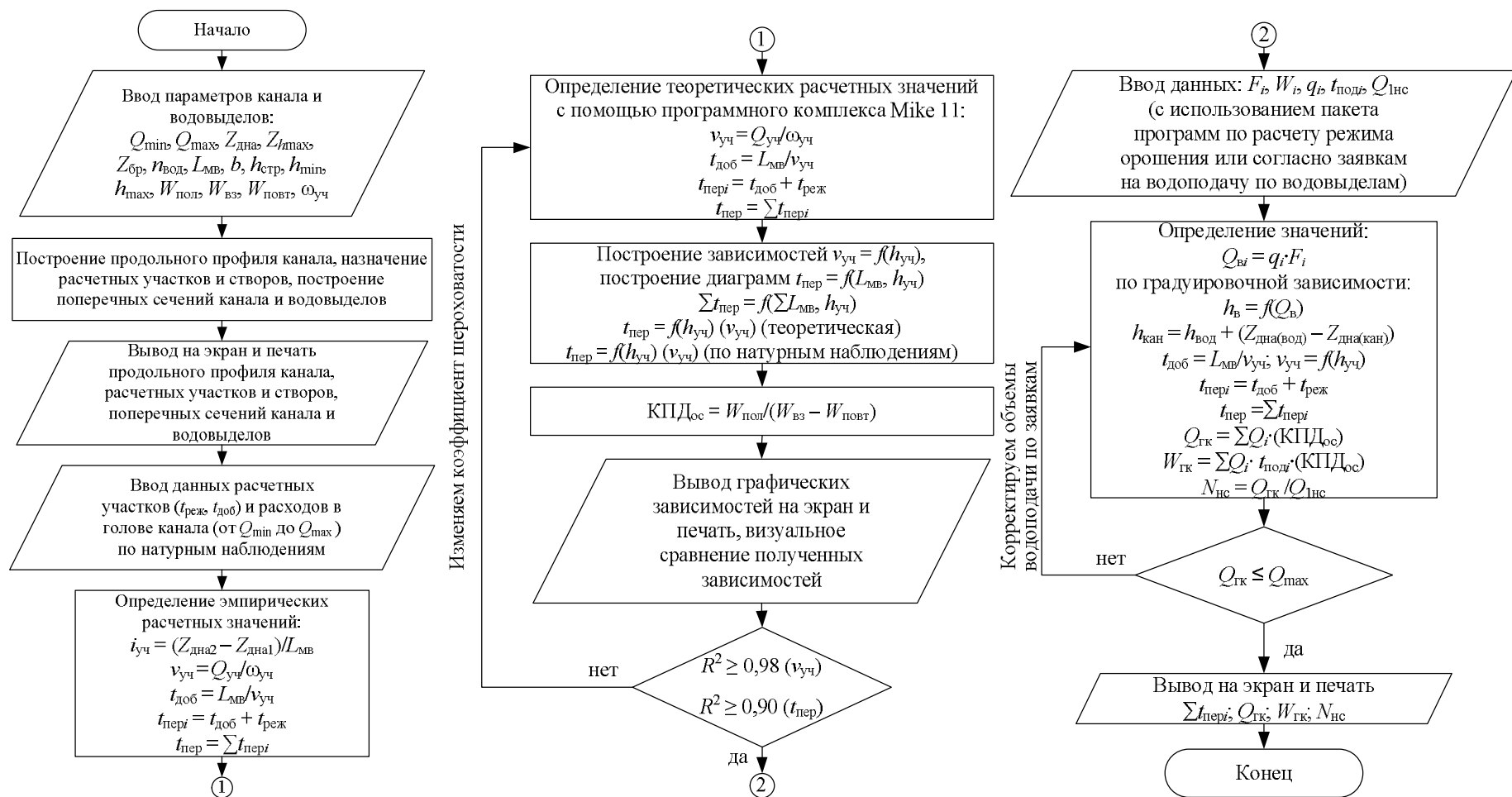


Рисунок 4 – Алгоритм программы реализации модели динамического управления процессами водораспределения на канале открытой оросительной сети

- $t_{\text{пер}i}$ – продолжительность перерегулировки глубин на участке, с;
- $t_{\text{доб}}$ – время добегания фронта волны начального возмущения между створами, с;
- $i_{\text{уч}}$ – уклон участка;
- $Z_{\text{дна}2}$ – отметка дна канала в створе 2, м;
- $Z_{\text{дна}1}$ – отметка дна канала в створе 1, м;
- $v_{\text{уч}}$ – скорость потока воды на участке, м/с;
- $\text{КПД}_{\text{ос}}$ – КПД оросительной сети;
- R – величина достоверности аппроксимации;
- F_i – площадь, обслуживаемая водовыделом, га;
- W_i – объем воды на водовыделе, м³;
- q_i – значение гидромодуля на водовыделе, л/(с·га);
- $t_{\text{под}i}$ – продолжительность подачи расхода на водовыделе, с;
- $Q_{\text{НС}}$ – производительность (расход воды) одного насосного агрегата, м³/с;
- Q_i – суммарный расход воды водовыделов, м³/с;
- $Q_{\text{в}i}$ – расход воды на водовыделе, м³/с;
- $h_{\text{вод}}$ – глубина воды на водовыделе, м;
- $h_{\text{кан}}$ – глубина воды в канале перед водовыделом, м;
- $Z_{\text{дна(вод)}}$ – отметка дна водовыдела, м;
- $Z_{\text{дна(кан)}}$ – отметка дна канала, м;
- $Q_{\text{ГК}}$ – расход воды в голове канала, м³/с;
- $W_{\text{ГК}}$ – объем воды в голове канала, м³;
- $N_{\text{нс}}$ – количество насосных агрегатов, ед.

В реальных условиях эксплуатации оросительных систем план водопользования подлежит регулярной корректировке в зависимости от влия-

ния различных факторов, в частности от постоянно меняющихся погодных условий.

Формирование сценарных расчетов производится на основе заявок водопотребителей (графиков водоподачи по участкам). Исходными данными для расчета являются площадь орошения и заявленный объем водоподачи по каждому водовыделу или гидромодуль водовыдела. Эти данные могут также представляться из пакета программ по расчету режимов орошения.

Пример представления результатов вычислений имитационной моделью динамического управления водораспределением на канале Р-1 Райгородской оросительной системы представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчета параметров водораспределения

Номер водовыдела	Исходные данные			Расчетный параметр водораспределения					
	Площадь, обслуживаемая водовыделом, га	Гидромодуль водовыдела, л/(с·га)	Заявленный объем водоподачи, м ³	Расход водовыдела, м ³ /с	Продолжительность подачи расхода, с	Глубина на водовыделе, м	Глубина в канале перед водовыделом, м	Время добегания расхода, м	Продолжительность перерегулировки, с
1	367	0,6	190252,8	0,22	864000	0,27	1,17	7244	7377
2	620	0,5	267840,0	0,31	864000	0,30	1,15	8156	15400
3	208	0,4	71884,8	0,08	864000	0,20	0,97	1316	16717
4	110	0,5	47520,0	0,06	864000	0,18	0,81	236	16953
5	105	0,6	54432,0	0,06	864000	0,18	0,98	19567	36520
6	260	0,7	157248,0	0,18	864000	0,25	0,90	9736	46256
7	65	0,8	44928,0	0,05	864000	0,17	1,12	16351	62607
8	145	0,6	75168,0	0,09	864000	0,20	1,12	8097	70705
9	47	0,8	32486,4	0,04	864000	0,16	1,03	3299	74003
10	64	0,8	44236,8	0,05	864000	0,17	0,96	2319	76323
11	1200	0,2	207360,0	0,24	864000	0,27	0,82	6511	82834
Выходные параметры: КПД канала Р-1, КПД = 0,77. Фактический расход в голове канала (брутто), $Q_{g.br} = 1,79 \text{ м}^3/\text{с}$. Фактический объем водоподачи (брутто), $W_{g.br} = 1547209,3 \text{ м}^3$. Суммарная продолжительность перерегулировки глубин по всем водовыделам для удовлетворения всех заявок на водоподачу, $t_{пер} = 82834 \text{ с}$. Количество одновременно работающих насосных агрегатов производительностью $0,9 \text{ м}^3/\text{с}$, $N_{нс} = 2 \text{ ед}$.									

Вывод. Таким образом, разработанная имитационная модель водораспределения на канале Р-1 Райгородской оросительной системы в зависимости от заявленных объемов водоподачи по водовыделам позволяет определить суммарный головной расход в голове канала, фактический объем водоподачи, время обеспечения расходами всех водовыделов, а также количество одновременно работающих насосных агрегатов для обеспечения необходимых расходов.

Сравнение полученных результатов определения продолжительности перерегулировки глубин на расчетных участках канала Р-1 выявило максимальное расхождение теоретических и опытных данных, составляющее 3049 с. Оно связано с влиянием различных эксплуатационных факторов, которые невозможно учесть при построении имитационной модели. Максимальные значения коэффициентов асимметрии и вариации статистической совокупности теоретических и опытных данных составляют соответственно $C_s = 1,86$ ($C_s < 5$), $C_v = 0,15$ ($C_v < 3$).

Список литературы

- 1 Натальчук, М. Ф. Эксплуатация гидромелиоративных систем / М. Ф. Натальчук, В. И. Ольгаренко, В. А. Сурин. – М.: Колос, 1995. – 320 с.
- 2 Щедрин, В. Н. Совершенствование конструкций открытых оросительных систем и управления водораспределением / В. Н. Щедрин. – М.: Мелиорация и водное хозяйство, 1998. – 160 с.
- 3 Временное руководство по проектированию и эксплуатации автоматизированных оросительных систем. В 2 ч. Ч. I / В. Н. Щедрин [и др.]. – Новочеркасск: Югмелиорация, 1989. – 160 с.
- 4 Временные рекомендации по составлению и реализации планов водопользования на оросительных системах Ростовской области: утв. науч.-техн. советом Управления «Ростовмелиоводхоз» 30.06.09, протокол № 1. – Коломна, 2009. – 105 с.
- 5 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.
- 6 Чураев, А. А. Управление процессами водораспределения на оросительных системах: науч. обзор / А. А. Чураев, Л. В. Юченко, М. В. Вайнберг; ФГБНУ «РосНИИПМ». – Новочеркасск, 2014. – 52 с. – Деп. в ВИНТИ 02.06.14, № 156-B2014.
- 7 Бочкарев, Я. В. Эксплуатационная гидрометрия и автоматизация оросительных систем / Я. В. Бочкарев. – М.: Агропромиздат, 1987. – 175 с.
- 8 Маковский, Э. Э. Автоматизированные автономные системы трансформации неравномерного стока / Э. Э. Маковский, В. В. Волчкова. – Фрунзе: Илим, 1981. – 380 с.

9 Ткачев, А. А. Активное управление водораспределением в магистральных каналах с предельно обеспеченным (100 %) водопотреблением уровней воды на перегораживающих сооружениях / А. А. Ткачев // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2006. – № 2. – С. 100–109.

10 Ткачев, А. А. Управление водораспределением в каналах с локальным регулированием уровней воды по верхнему бьефу перегораживающих сооружений / А. А. Ткачев // Мелиорация и водное хозяйство. – 2008. – № 5. – С. 35–40.

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

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

13 Мелиорация и водное хозяйство. Орошение: справ. / И. П. Айдаров [и др.]; под ред. Б. Б. Шумакова. – М.: Колос, 1999. – 432 с.

14 Коваленко, П. И. Управление магистральным каналом как объектом с распределенными параметрами / П. И. Коваленко, В. А. Овчинников, Б. А. Акишин // Гидротехника и мелиорация. – 1978. – № 3. – С. 50–55.

Щедрин Вячеслав Николаевич

Ученая степень: доктор технических наук

Ученое звание: академик Российской академии наук, профессор

Должность: директор

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Shchedrin Vyacheslav Nikolayevich

Degree: Doctor of Technical Sciences

Title: Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor

Position: Director

Affiliation: Russian Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovskiy ave., 190, Novocherkassk, Rostov reg., Russian Federation, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Чураев Александр Анатольевич

Ученая степень: кандидат технических наук

Должность: заместитель директора по науке

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: churaev75@mail.ru

Churaev Aleksander Anatolievich

Degree: Candidate of Technical Sciences

Position: Deputy Director of Science

Affiliation: Russian Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovskiy ave., 190, Novocherkassk, Rostov reg., Russian Federation, 346421

E-mail: churaev75@mail.ru

Школьная Валерия Михайловна

Должность: младший научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: valeriya-shkodna@mail.ru

Shkol'naya Valeriya Mikhaylovna

Position: Junior Researcher

Affiliation: Russian Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovskiy ave., 190, Novocherkassk, Rostov reg., Russian Federation, 346421

E-mail: valeriya-shkodna@mail.ru

Юченко Любовь Васильевна

Должность: научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Yuchenko Lyubov' Vasil'evna

Position: Researcher

Affiliation: Russian Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovskiy ave., 190, Novocherkassk, Rostov reg., Russian Federation, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru