

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации

Департамент мелиорации

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

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ
И СРЕДСТВ ЦИФРОВОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ
ЦЕЛЕЙ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ И РАЦИОНАЛЬНОГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ НА МЕЖХОЗЯЙСТВЕННЫХ И
ВНУТРИХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ
ЮЖНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА РФ

Новочеркасск 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЦИФРОВОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ И РАЦИОНАЛЬНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ НА МЕЖХОЗЯЙСТВЕННЫХ И ВНУТРИХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ЮЖНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА РФ (2-Я РЕДАКЦИЯ)	4
1 Общие положения.....	4
2 Описание задач, решаемых с использованием цифровых компьютерных моделей.....	5
2.1 Одномерное моделирование гидродинамических процессов	5
2.2 Моделирование водохозяйственных задач	6
3 Требования к программному обеспечению	8
4 Требования к составу и структуре исходных данных для разработки цифровых компьютерных моделей.....	10
4.1 Исходные данные для гидродинамической модели	10
4.2 Исходные данные для водохозяйственной модели	12
5 Функциональные требования к цифровым компьютерным моделям.....	14
5.1 Требования к функциональным возможностям одномерной модели ...	14
5.2 Требования к функциональным возможностям водохозяйственной модели.....	16
6 Порядок операций, выполняемых при разработке цифровых компьютерных моделей	17
6.1 Разработка гидродинамической модели.....	17
6.2 Разработка водохозяйственной модели.....	21
7 Порядок и правила проведения верификации цифровых компьютерных моделей.....	23
8 Требования к результатам моделирования	25
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	27
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	28
ПРИЛОЖЕНИЕ А Примеры решения оптимизационных водохозяйственных задач на оросительных системах.....	30

ВВЕДЕНИЕ

Основными направлениями государственной политики в области использования водных ресурсов, согласно Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года, являются гарантированное обеспечение водными ресурсами населения и отраслей экономики и повышение рациональности использования водных ресурсов.

Задача рационального и эффективного использования водных ресурсов на основе проведения производственных исследований может быть оптимизировано за счет применения современных средств измерения и инновационных программных компьютерных средств гидродинамического цифрового моделирования, которые в настоящее время практически не применяются в мелиоративном комплексе России.

На данном этапе подготовлены Рекомендации по использованию современных методов и средств цифрового компьютерного моделирования для целей анализа эффективности и рационального использования водных ресурсов на межхозяйственных и внутрихозяйственных оросительных системах (для Южного федерального округа РФ), которые могут быть использованы для разработки цифровых гидродинамических и водохозяйственных моделей.

Основанием для проведения работ по теме 2.1.5 являлся тематический план осуществления прикладных научных исследований и разработок, оказания консультационных услуг и реализации образовательных программ федеральным государственным бюджетным научным учреждением «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации» (ФГБНУ «РосНИИПМ») по государственному заданию Минсельхоза России на 2015 год и тематический план на 2015–2017 гг.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЦИФРОВОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ И РАЦИОНАЛЬНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ НА МЕЖХОЗЯЙСТВЕННЫХ И ВНУТРИХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ЮЖНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА РФ (2-Я РЕДАКЦИЯ)

1 Общие положения

Основа программных комплексов цифрового моделирования – математическая модель, которая представляет задачу в упрощенном виде и описывает только те свойства и закономерности, которые наиболее важны для данного объекта или процесса.

При моделировании процессов в математической модели объекта используются реальные характеристики оросительной системы, поэтому нет необходимости пересчета результатов математического моделирования с модели на натуру, и соответственно не возникает проблемы критериев подобия.

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.

Для решения задачи эффективности и рациональности использования водных ресурсов на межхозяйственных и внутрихозяйственных оросительных системах с помощью современных средств компьютерного моделирования рекомендуется применять комплексный подход, который заключается в использовании различных программных модулей совместно. Так для моделирования движения потока и описания его основных параметров рекомендуется использовать гидродинамическую модель, а для решения задач, связанных с вопросами водообеспечения, – водохозяйственную.

2 Описание задач, решаемых с использованием цифровых компьютерных моделей

Современные средства компьютерного моделирования в зависимости от их предназначения решают различное количество как гидродинамических (одномерное моделирование), так и водохозяйственных задач.

2.1 Одномерное моделирование гидродинамических процессов

Задача одномерного моделирования (одномерной схематизации) может быть решена с использованием программного комплекса MIKE 11 или других программных продуктов, обладающих аналогичным набором опций и интерфейсом.

Одномерная схема моделирования гидродинамических процессов предполагает усреднение расходов и скоростей по площади поперечного сечения [1]. Результатом расчета при решении одномерной задачи являются значения переменных во времени характеристик потока, таких как расходы, уровни и глубины воды, средние по сечению скорости, кривые свободной поверхности с учетом всех описанных сооружений и особенностей канальных систем (рисунок 1).

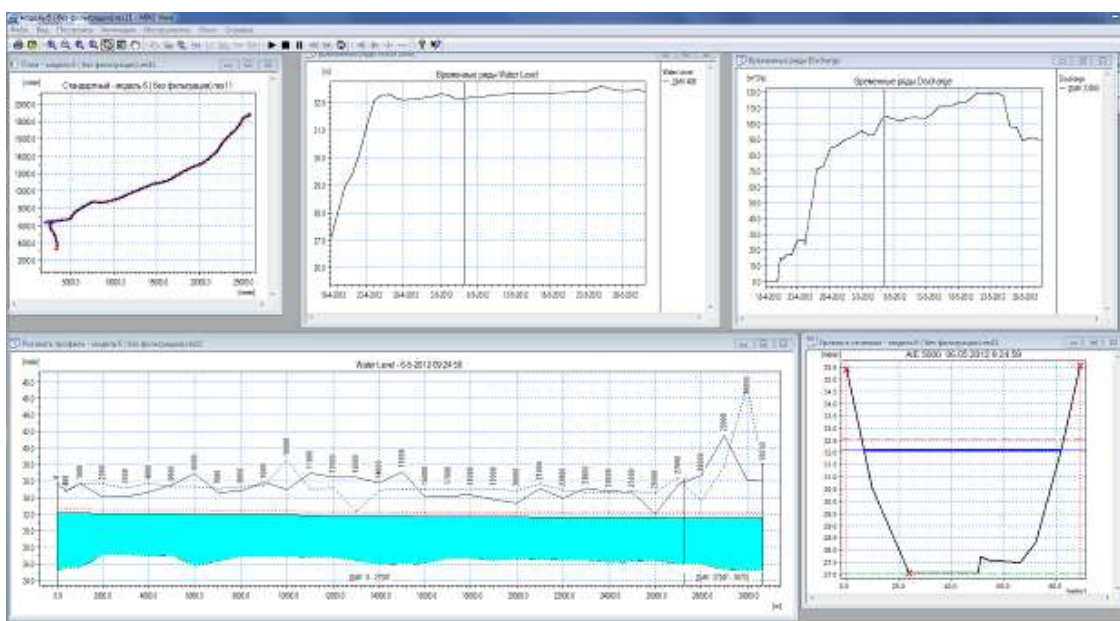


Рисунок 1 – Одномерная модель участка

Для решения задач оптимизации водораспределения на оросительных системах, в местах, где поток управляется движением затвора, модель дает возможность моделирования его работы. В общем смысле модель позволяет маневрировать регулируемыми затворами на гидросооружениях и регулирующих ирригационных узлах. Управление затвором может зависеть от уровня воды, разности уровней в двух заданных точках, расхода или разности расходов в двух заданных точках или может задаваться в явном виде как функция от времени. Также регулирование может осуществляться как маневрирование затвором с целью выдерживания какого-либо указанного уровня воды в верхнем бьефе. Затвор может быть определен как переливной или истекающий, в котором поток проходит под затвором [2, 3].

Модель позволит значительно снизить временные затраты при работе с реальными объектами и моделями, где требуется проработать и оценить различные эксплуатационные режимы работы сооружений. В том числе и при работе с моделью оросительных каналов, где необходимо рассматривать различные режимы работы подъемно-опускных затворов с целью подбора оптимального гидравлического и экономически обоснованного варианта.

2.2 Моделирование водохозяйственных задач

Современные средства компьютерного цифрового моделирования выполняют имитационное моделирование на основе применения водобалансовых методов в каждой характерной точке и позволяют решать различные водохозяйственные задачи, в том числе:

- комплексно анализировать водообеспечение как в рамках всего водного бассейна, так и его отдельных частей;
- производить учет отраслевого промышленного и сельскохозяйственного водопотребления, режимов эксплуатации водохранилищ многоцелевого назначения;

- проводить водохозяйственное обоснование схем водоотведения, перероски стока;
- выполнять гидроэнергетические расчеты и расчеты выработки электроэнергии;
- профессионально учитывать многоплановые экологические требования и ограничения.

Задание параметров и изменение характеристик водопотребления осуществляется с помощью специально разработанного программного инструментария. Модельная система функционирует на основе цифровой схемы оросительной сети, создаваемой в режиме экранного редактирования в оболочке географической базы данных (рисунок 2).

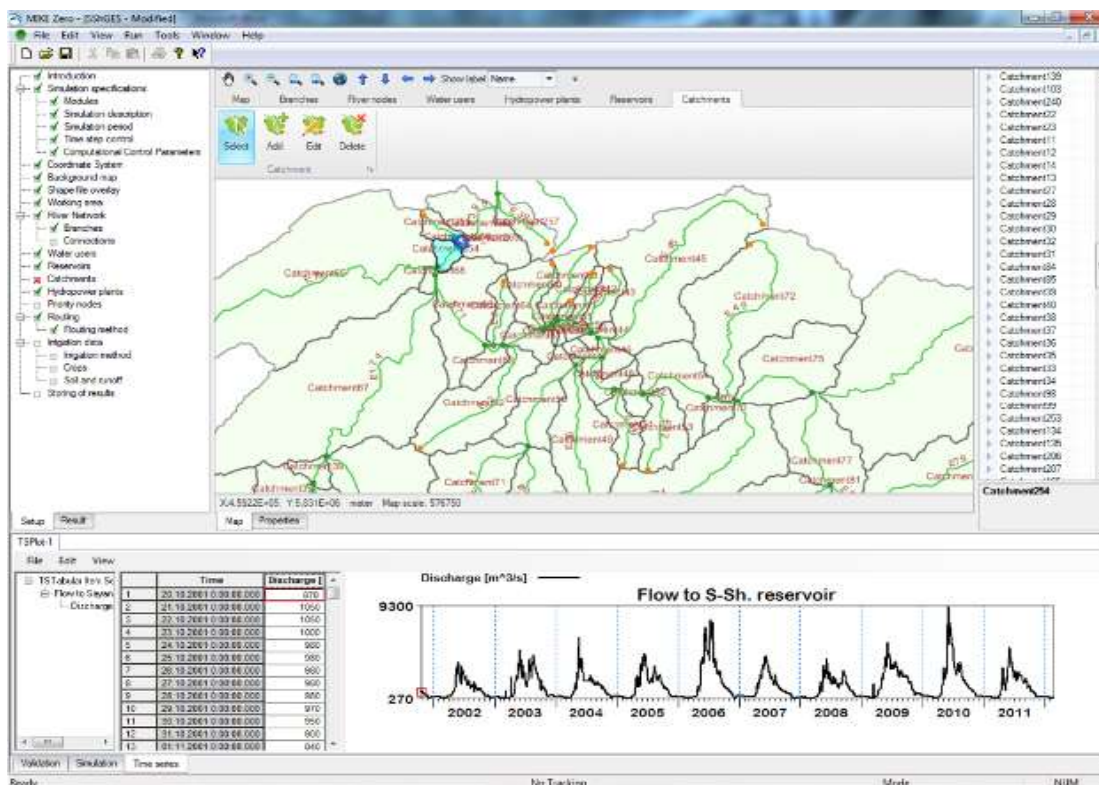


Рисунок 2 – Водохозяйственная модель

Важной особенностью водохозяйственных моделей является возможность задавать приоритетность водохозяйственных нужд для каждого водопотребителя. Каждый водопотребитель может иметь несколько водисточников и руководствоваться при этом разной приоритетностью водохозяйственных нужд. Подобным образом можно задавать различные приоритеты разда-

чи и для каждого водоисточника. Правила приоритетности в этом случае определяют как распределяется вода в маловодье.

Водохозяйственные модели помогают в принятии обоснованных управленческих решений в условиях сезонного или кратковременного дефицита водных ресурсов. При этом учитывается приоритетность водохозяйственных нужд, отличия городских и сельских водопотребителей, а также социально-экономические ограничения.

Водохозяйственные задачи могут быть решены при использовании многоцелевого программного средства нового поколения для планирования и управления водными ресурсами в рамках одного или нескольких речных бассейнов MIKE HYDRO Basin или аналогов [4].

3 Требования к программному обеспечению

Положения настоящего раздела могут быть использованы при закупке программного обеспечения для целей разработки технического задания на предоставление простого неисключительного права на коммерческое использование компьютерного программного комплекса цифрового моделирования.

Программное обеспечение должно позволять осуществлять высокоточное цифровое моделирование течений в системах мелиоративных каналов, а также моделирования водохозяйственных задач.

Программное обеспечение должно обеспечивать решение следующих задач:

- моделирование процессов управления ГТС для целей оптимизации управления водораспределением;
- проведение оценки работы ГТС и мелиоративных систем при различных эксплуатационных и гидрологических сценариях;
- гидравлическое обоснование и оценка проектных предложений по реконструкциям объектов на водотоках, а также по проектам изменения гидрологического режима (например, изменение водоподачи в систему каналов,

подключение или отключение абонентов на распределительных каналах или изменение их режима водоразбора);

- комплексное описание гидрологических и водохозяйственных процессов;

- описание воздействия каждого водопользователя на водный режим и качество воды в оросительной сети;

- интегрированное управление водными ресурсами (ИУВР);

- сценарии использования водных ресурсов;

- исследования для условий маловодья;

- эксплуатация водохранилищ;

- информационное обеспечение схем комплексного использования и охраны водных (СКИОВР);

- разработка оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) [5, 6].

Программный комплекс должен быть сертифицирован по системе сертификации ГОСТ Р и соответствовать требованиям нормативных документов: ГОСТ 34.201-89 (раздел 1), ГОСТ 28195-89 (таблица 1, пп. 1, 3, 4, 5, 6), ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93 (раздел 4), ГОСТ Р ИСО 9127-94 (пп. 6.3–6.5).

Предоставление простого неисключительного права на использование программного комплекса должно быть осуществлено на условиях и в рамках лицензионного договора, по которому простое неисключительное право на использование лицензии программного продукта, включая неотъемлемые части: дистрибутив, защитный ключ, файл лицензии и техническая документация, передается в бессрочное пользование.

Право на использование программного комплекса должно быть предоставлено компанией, которая является авторизованным партнером или официальным дистрибьютором компании-производителя программного обеспечения на территории Российской Федерации, что должно быть подтверждено копией соответствующего сертификата.

Программный продукт должен иметь импорт (экспорт) файлов из ГИС-систем, баз данных.

Управление должно быть реализовано посредством интерактивной системы меню, снабженной развитыми средствами подсказок и защиты от ошибок.

Программный продукт должен быть полностью ориентирован на среду WINDOWS со встроенным графическим пользовательским интерфейсом.

4 Требования к составу и структуре исходных данных для разработки цифровых компьютерных моделей

В зависимости от задачи моделирования, технических и эксплуатационных характеристик ГТС, гидрологических и топографических условий определяются состав, структура, объем и точность исходных данных для разработки компьютерных цифровых моделей.

В каждом конкретном случае состав и объемы исходных данных могут быть различными и должны уточняться и конкретизироваться в техническом задании на разработку модели.

4.1 Исходные данные для гидродинамической модели

Задание исходных данных для расчетов неустановившегося движения воды в каналах должно производиться на основе материалов актуальных инженерно-геодезических и инженерно-гидрометеорологических изысканий.

Для одномерной гидродинамической модели исходные данные можно разделить на три группы: топографические, гидрологические (гидравлические) и гидротехнические [7–9].

Топографические данные дают описание геометрии моделируемого участка, т. е. ширины, площадей поперечного сечения и т. д., называемые также морфометрическими данными. Основные морфометрические характеристики русла для одномерной гидродинамической модели – поперечные сечения (рисунок 3), которые измеряются на характерных участках канала. Оптимальная частота измерения длины канала для морфологической характери-

стики зависит от его особенностей, но для стабильной работы модели рекомендуется измерять поперечные сечения не реже 500 м.

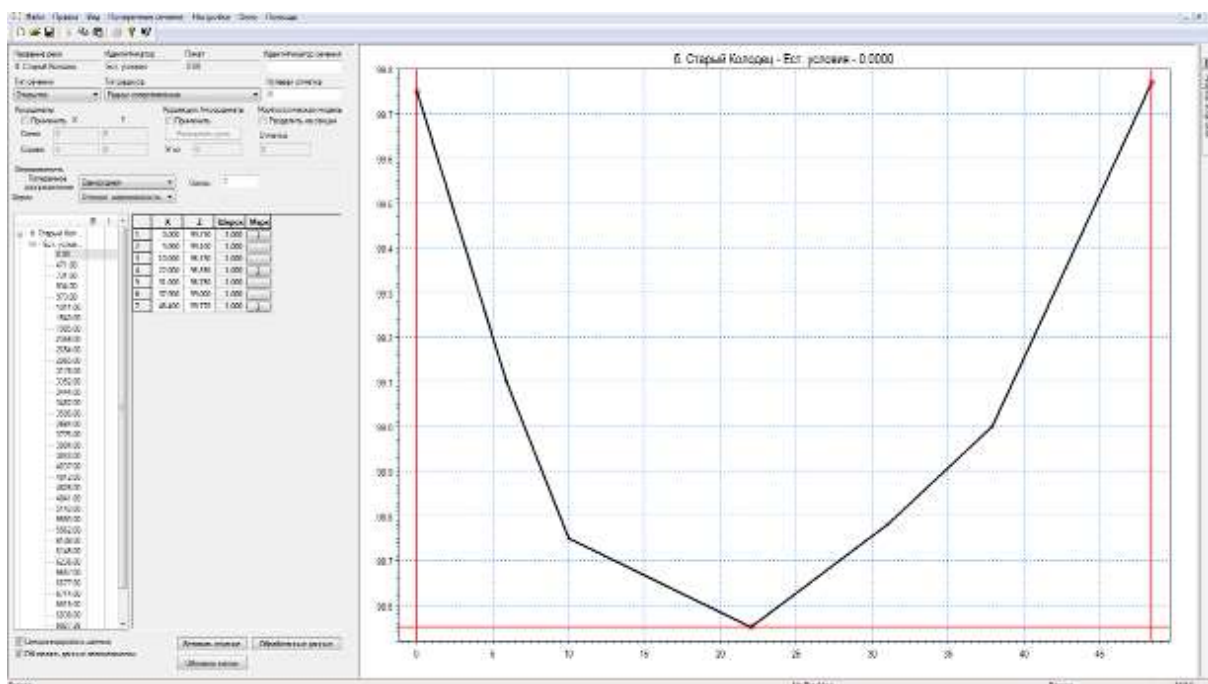


Рисунок 3 – Поперечное сечение русла (программный комплекс MIKE 11)

На основе этих данных разрабатывается топология модели:

- выделяют характерные поперечные сечения вдоль канала, где должны быть расположены расчетные точки;
- границы между межхозяйственными и внутривладельческими каналами;
- определяется местоположение ГТС.

Гидрологические данные включают:

- водомерные графики и гидрографы;
- измерения уровней, расходов и скоростей;
- кривые расходов;
- коэффициент фильтрации;
- шероховатость;
- аппроксимацию волны;
- другое.

Эти данные служат двум целям:

- установлению граничных условий модели;
- калибровке модели, которая позволяет уточнить расходные характеристики русла, коэффициенты расхода водосливов и другие гидравлические параметры, которые нельзя определить на основе лишь топографических данных.

Гидротехнические данные – сведения о ГТС, их назначение, об отметках уровней воды в водохранилищах, о составе сооружений гидроузлов, о типе и характеристиках водосбросов, о графиках работы гидроэлектростанции.

4.2 Исходные данные для водохозяйственной модели

Для водохозяйственной модели основными исходными данными является описание параметров и свойств различных элементов, которые относятся к водохозяйственному расчету – это речная сеть, водосбор, водопользователи, водохранилища (рисунок 4).

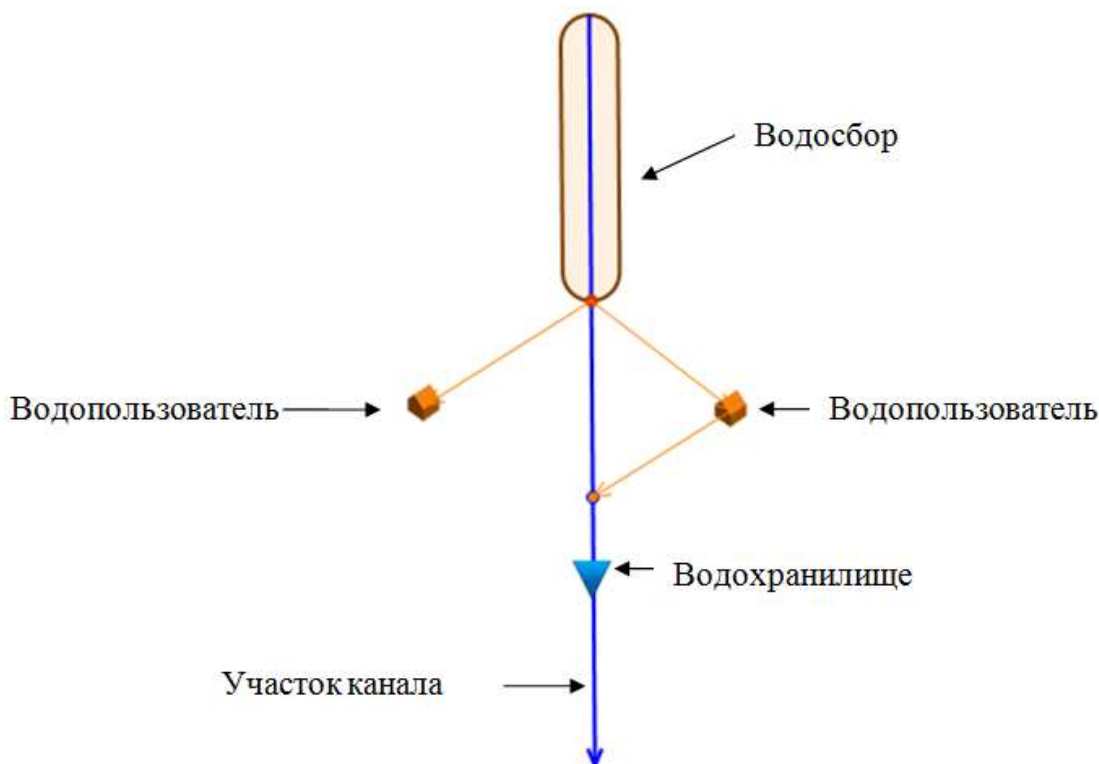


Рисунок 4 – Схематичное изображение исходных данных для водохозяйственной модели (MIKE HYDRO Basin)

В параметрах речной сети указывается длина канала и направление течения.

Водосбор описывается площадью, моделью грунтовых вод и временным рядом осадков.

Для водопользователей необходимо определить тип, водосбор-источник водоснабжения, приоритетность.

Водопользователи в модели бывают следующих типов:

- регулярные водопотребители: их водопотребление задается графиком водопотребления (т. е. файлом с временным рядом);

- ирригационные системы: их водопотребление рассчитывается на основе характеристик сельскохозяйственных культур и соответствующей климатической модели.

Для регулярных водопотребителей могут быть установлены два типа временных рядов:

- график заявочного водопотребления, который задается временным рядом. Это общее количество воды, которое требуется для обеспечения потребностей водопользователя в воде;

- доля переноса водопотребления от одного временного шага к следующему. В таком случае водораспределение по потребителям производится на определенный момент во времени (т. е. на заданный временной шаг).

Приоритетность определяется в случае, если на водоисточнике имеется более одного водопользователя.

По такому же принципу приоритетность определяется и для водозабора и имеет два типа данных:

- минимальный расход – это означает, что заданный минимальный расход, проходя через приоритетный водозабор, будет передаваться ниже по течению в любом случае. При этом водозабор для водопотребителей из данного узла сможет осуществляться только при обеспечении заданного минимального расхода;

- приоритеты – подразделяется на: подачу согласно приоритетности – в данном случае каждый из водопотребителей получает необходимый ему объем воды в порядке приоритетности; подачу согласно долям расхода – каждому водопотребителю присваивается доля доступной воды в приоритетном водозаборе. Сумма присвоенных долей должна равняться единице.

Основными входными данными для водохозяйственной модели являются различные временные ряды (например, многолетние гидрологические ряды). Фактически, для того, чтобы рассчитать модель, достаточно задать только временной ряд стока с водосбора. Дополнительные данные описывают характеристики водохранилищ и правила управления, метеорологические данные, параметры потребности в воде или параметры систем орошения. Также задаются данные по гидравлическим условиям в реках и каналах, параметры грунтовых вод и др. [8].

5 Функциональные требования к цифровым компьютерным моделям

5.1 Требования к функциональным возможностям одномерной модели

Модель должна позволять осуществлять динамическое моделирование на основе одномерных уравнений неустановившегося движения Сен-Венана в открытых руслах. Одномерная гидродинамическая модель должна разрабатываться с учетом реализации описания докритических и сверхкритических режимов течения.

Модель должна учитывать:

- характеристики водохранилищ и регулирующих резервуаров;
- произвольные поперечные сечения, регулирующие сооружения, мостовые и трубопроводные переходы;
- отметки планировки и геометрию магистральных авто- и железных дорог;
- временную неравномерность приходящих в канал расходов;

- геометрию и пропускную способность водосбросных пролетов при регулировании;

- присоединение гидрографов стока из гидрологической модели должно быть реализовано в автоматическом режиме;

- описание водохранилищ, прудов или иных аккумулирующих емкостей должно осуществляться набором поперечных сечений или задаваться единой точкой с сосредоточенными в ней батиграфическими характеристиками ($W(H)$ или $S(H)$), где W – объем, S – площадь зеркала, H – абсолютная отметка) [9].

Модель должна учитывать режим управления открытием затворов на основе правил регулирования при выполнении следующих критериев:

- не превышения заданного расхода, поступающего в НБ;
- не превышения УВБ заданной отметки НПУ или не выход уровня воды за пределы допустимого диапазона (ФПУ).

Модель должна иметь следующие возможности:

- накапливать в базе данные режимных характеристик работы затворов;
- формировать график маневрирования щитами водосброса путем минимизации объема подтопления в нижнем бьефе водохранилища;

- в режиме диалога формировать график маневрирования щитами по заданному графику сброса воды в нижний бьеф.

При модельном описании водотоков и водоемов должны быть обеспечены следующие возможности:

- загрузка фоновых растровых и векторных электронных карт (в обменном формате shp), реализация географической привязки и стыковка листов растровых карт;

- поддержка мировых географических и картографических проекций, а также использование местных систем координат и создание пользовательских систем координат;

- описание трасс водотоков внутренним инструментарием или импорт гидрографической сети из электронных карт (из формата *.shp);

- графические пользовательские настройки отображения элементов модели на плане;
- автоматическое и пользовательское формирование расчетных точек;
- описание линейных, разветвленных и закольцованных систем [10, 11].

5.2 Требования к функциональным возможностям водохозяйственной модели

Водохозяйственная модель должна включать в себя описание процессов и правил, требуемых для большинства проектов планирования использования водных ресурсов речных бассейнов, а также возможность управления шагами расчета по времени и единицами измерения величин.

Модель должна иметь следующие возможности:

- возможность задавать приоритеты для водопользователей и водисточников;
- учитывать дополнительные параметры эксплуатации водохранилищ;
- детальное моделирование водохранилищ;
- гидрологическое моделирование, включая метеорологические условия, грунтовые воды и орошение;
- моделировать формирование стока с водосборов;
- моделирование качества воды;
- открытый код – с помощью несложного программирования может включить в себя любые дополнительные правила и описания процессов;
- возможности представления результатов моделирования в графическом и табличном виде, экспорт данных в другие приложения [8].

6 Порядок операций, выполняемых при разработке цифровых компьютерных моделей

6.1 Разработка гидродинамической модели

В большинстве случаев при проведении работ по разработке гидродинамической модели ГТС или канала выполняется описание морфометрических характеристик, задание гидрологической информации, описание ГТС, описание гидродинамических параметров (приложение А) [10, 12].

6.1.1 Описание морфометрических характеристик

При задании морфостворов должно быть выполнено:

- задание плановых характеристик сети каналов и разработка плановой топографической основы (рисунок 5);
- задание открытых и замкнутых поперечных сечений (рисунок 6);
- ручной или автоматический ввод (импорт) табличных данных для построения сечений (x, z , где x – расстояние от постоянного начала, z – отметка) из внешних источников;
- автоматическое получение гидравлических характеристик сечения в табличном виде (ширина, площадь живого сечения, гидравлический радиус, расходная характеристика) (рисунок 7);
- линейная интерполяция (по длине, ширине и отметкам), создание промежуточных поперечных сечений;
- задание переменной шероховатости по глубине сечения.



Рисунок 5 – Плановое положение участка моделирования

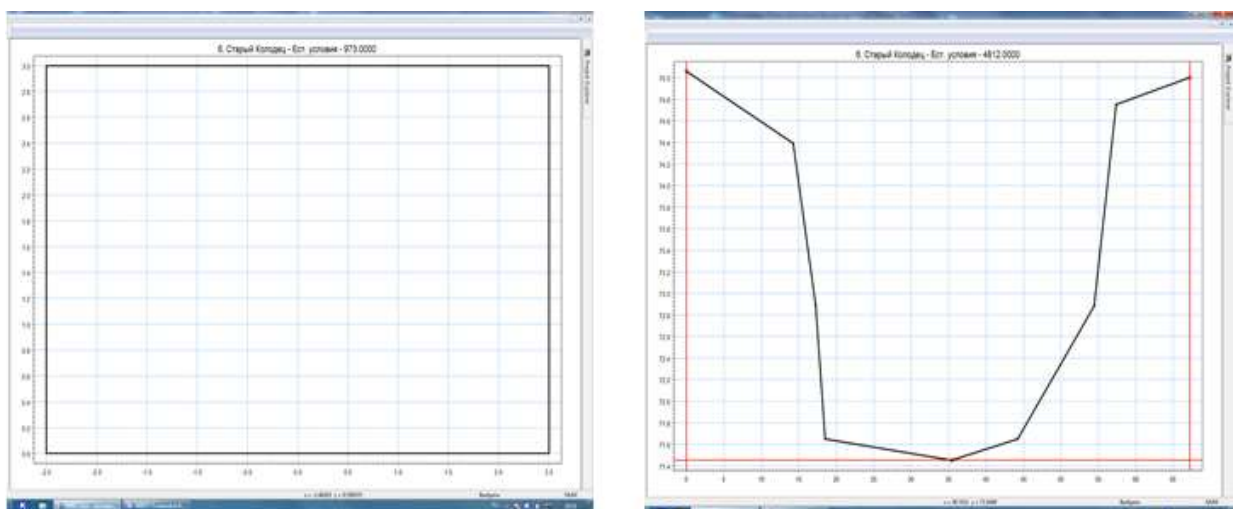


Рисунок 6 – Закрытое и открытое поперечные сечения

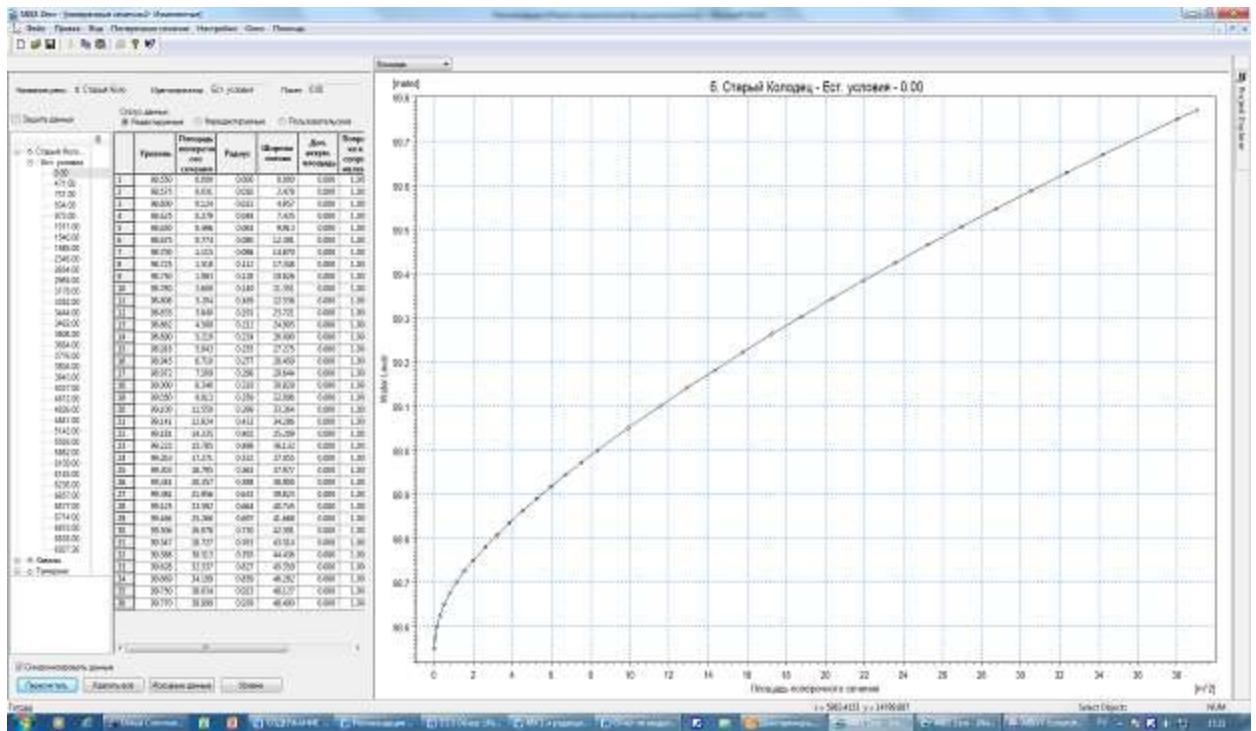


Рисунок 7 – Гидравлические характеристики сечения (программный комплекс MIKE)

6.1.2 Задание гидрологической информации

При задании гидрологической информации должно быть выполнено:

- задание точечных и распределенных по длине водотока притоков;
- задание точечных заборов воды и распределенных по длине оттоков в виде потерь воды на испарение, разгрузку в грунтовые воды и т. д.;
- описание граничных условий в виде констант или переменных во времени расходов или уровней воды, а также кривой связи $Q(h)$;
- описание временной шкалы графиков с постоянным или переменным неравномерным шагом (рисунок 8);
- интерполяция пропущенных данных.

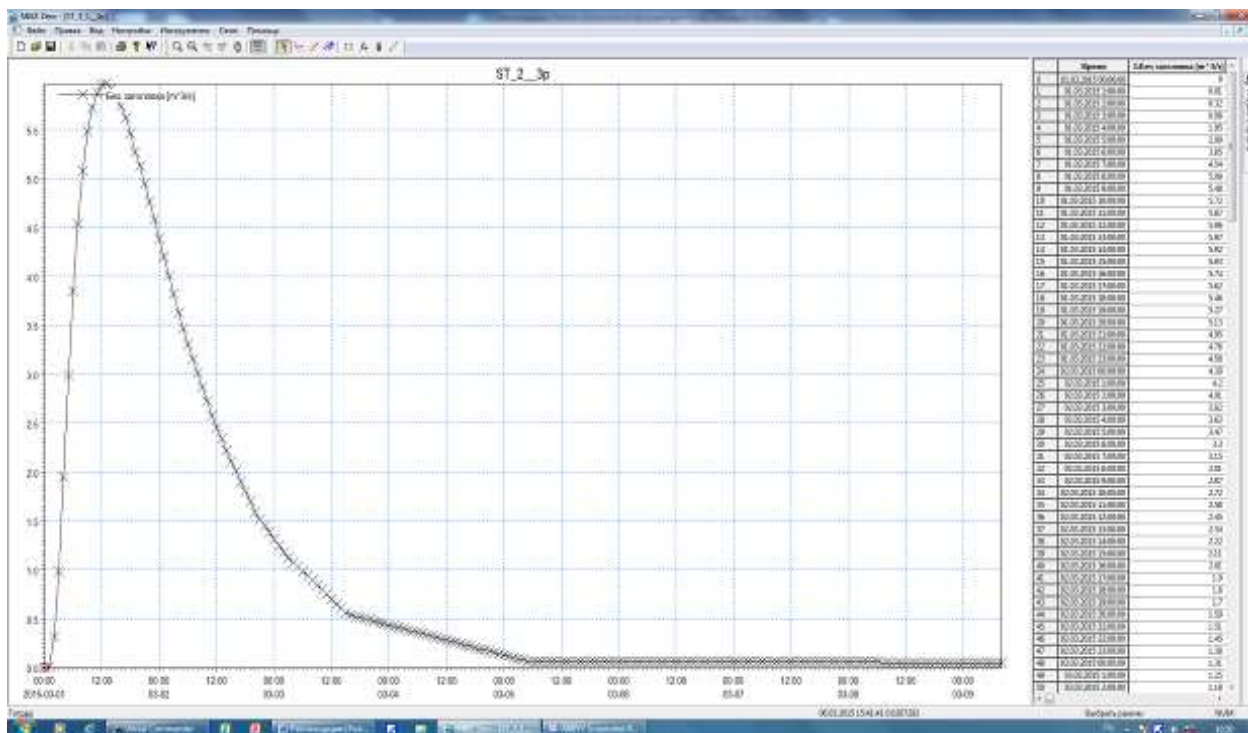


Рисунок 8 – График временного ряда

6.1.3 Описание гидротехнических сооружений

При задании информации о ГТС должно быть выполнено:

- описание ГТС при различных компоновках;
- задание сооружений стандартной и нестандартной геометрической формы;
- описание различных типов сооружений;
- плотины, водосливы с широким порогом и тонкой стенкой, незатопленные и затопленные;
- водосбросные и водопропускные отверстия стандартных и криволинейных форм с клапаном и без (водосбросы на гидроузлах и водопропускные сооружения в каналах);
- мосты с различными формами опор;
- щитовые и сегментные затворы;

- при известной кривой пропускной способности сооружения возможность задания ее в табличном виде при различных сочетаниях уровней воды в верхнем и нижнем бьефе;

- автоматический расчет пропускной способности сооружений при учете геометрии, отметок и размеров сооружения и задании коэффициентов потерь на входе и на выходе;

- описание работы сооружения по заданному графику $Q(t)$;

- описание комбинированных сооружений (сооружений разных типов, сосредоточенных в одном створе).

6.1.4 Описание гидродинамических параметров

При описании гидродинамических параметров должно быть выполнено:

- описание переменной шероховатости вдоль по длине моделируемого участка;

- задание в водотоках начальных условий по расходам и уровням (глубинам, заполнениям) автоматически и пользовательски;

- учет влияния фильтрации (описывается коэффициентом фильтрации);

- возможность принятия заполнений моделируемых систем из готовых файлов результатов предварительных сценарных расчетов на конкретный момент времени;

- задание фиксированного или плавающего (адаптивного) шага расчета;

- использование различных аппроксимаций волны: динамическая и полная динамическая высшего порядка, диффузионная, кинематическая волна.

6.2 Разработка водохозяйственной модели

При разработке водохозяйственной модели общий порядок моделирования следующий:

- создание и задание параметров нового проекта;

- создание модельной схемы элементов речной водохозяйственной се-

ти;

- задание параметров и свойств каждого элемента;
- задание параметров модельного расчета;
- просмотр и анализ полученных результатов.

Основные операции, выполняемые при создании водохозяйственной модели, предполагают внесение различных параметров и выполнение следующих действий:

- определение периода модельного расчета;
- задание элементов речной сети (площадь водосбора, тип модели грунтового стока, временной ряд поверхностного стока);
- внесение данных по водопользователям. Раздел предполагает следующие данные: общие параметры водопользователей – тип, использование грунтовых вод, водосбор-источник водоснабжения; схема ирригации водопользователей – климатическая модель, метод определения дефицитов; орошаемые поля водопользователя – характеристика каждого поля, в зависимости от вида культур;
- данные по орошению (режим орошения);
- данные по выращиваемым культурам (наименование и тип расчетной модели для культуры, вегетационный период, урожайность);
- данные по почвам и стоку (тип почвенной модели, содержание влаги в почве, пористость, тип модели стока);
- данные по водохранилищам [4].

В зависимости от вида выращиваемых культур порядок операций может быть незначительно изменен (приложение А).

7 Порядок и правила проведения верификации цифровых компьютерных моделей

Важным и неотъемлемым этапом при создании модели является ее калибровка.

Калибровка моделей одномерного установившегося течения заключается в систематической корректировке расходной характеристики (коэффициентов шероховатости) в расчетных точках с целью получения совпадения между наблюдаемыми и полученными расчетом величинами.

Основными, а иногда и единственными исходными данными являются, кривые расходов. На основе их анализа строятся продольные профили водной поверхности для установившегося течения. Уровни воды, соответствующие в различных створах данному расходу, соединяют прямыми линиями.

Граничное условие для нижнего створа при установившемся течении определяется на модели соответствующей кривой расходов, в верхнем створе – рядом постоянных расходов. Выполняется ряд прогонов с длительностью, достаточной для достижения условий установившегося течения вдоль всего канала. Получаемые в результате прогонки продольные профили свободной поверхности сопоставляют с профилями, полученными с помощью кривых расходов вдоль канала, и фиксируют очевидные ошибки модели.

При равномерном течении кривые свободной поверхности должны быть параллельны друг другу и продольному профилю русла канала. Если расчетный и наблюдаемый профили не согласуются с помощью калибровки, уточняют расходные характеристики (коэффициенты шероховатости).

Калибровка для неустановившихся режимов течения состоит в подборе эмпирических гидравлических коэффициентов и параметров модели, при которых достигается наилучшее совпадение наблюдаемых и расчетных водомерных графиков (графиков хода уровней). Целесообразность использования водомерных графиков для неустановившихся условий

определяется тем, что измеренные расходы никогда не бывают очень точными, а зафиксированные изменения уровня во времени обычно надежны во многих створах вдоль водотока [6].

Перед началом калибровочных расчетов необходимо провести анализ существующих постов на исследуемом участке и данных наблюдений с них. Заранее требуется исключить из рассмотрения возможные некорректные данные, например, смыкание бьефов, паразитные (заведомо ошибочные) значения, выявленные необоснованные противууклоны.

При отсутствии стационарных гидропостов и данных наблюдений рекомендуется организация временных постов мониторинга с фиксацией уровня воды и параллельным измерением атмосферных осадков. Далее на основании метеоданных посредством гидрологической модели получают гидрографы приточности, которые затем применяются в гидравлические модели. Результаты гидравлических расчетов сравниваются с измеренными уровнями воды, и проводится необходимая корректировка.

Совпадение модели и измерений должно быть достигнуто по общей синхронности графиков, интенсивности нарастания уровня воды, пиковым значениям, времени прихода пика и интенсивности его спада.

После проведения калибровки должна быть осуществлена верификация модели.

Если после всех попыток откалибровать модель она не может удовлетворительно воспроизвести наблюденные уровни, то это может произойти по следующим причинам:

- способы измерения исходных данных и периодичность наблюдений неудовлетворительны. Ошибки могут возникать из-за неточного нивелирования или неправильного расположения водомерных постов;

- морфометрические характеристики канала заданы с недостаточной частотой по длине канала, могут потребоваться дополнительные натурные изыскания;

- заданы некорректные батиграфические характеристики водохранилищ или регулирующих емкостей при описании их поперечными сечениями. Рекомендуется сравнивать полученные площадные и объемные характеристики описанного в модели резервуара с его известной реальной батиграфией;

- при наличии притоков неправильно учтены или определены общий объем, форма (и временной ход) гидрографов притока.

Не учтена информация, касающаяся фильтрации воды:

- поглощение воды сухим грунтом;
- сезонное изменение шероховатости в результате влияния растительности.

8 Требования к результатам моделирования

Требования при моделировании одномерной гидродинамической модели:

- должны быть получены расходы, уровни, глубины и средние скорости течения в канале в любом створе моделируемой области. Данные должны быть представлены в виде графиков и таблиц;

- результаты приведены в виде кривых связей $Q-H$ для любых створов канала;

- расходы, уровни и скорости должны представляться также в виде продольного профиля. Кроме рассчитанных характеристик, на профиле должны быть отмечены мосты и другие характерные створы, места расположения поперечных сечений, места устьев притоков, отметки береговых бровок;

- представлен расчетный график маневрирования затворами для оптимального пропуска половодья (график и табличные данные);

- формирование карт ЦМР (карты донного и пойменного рельефа) по данным поперечных сечений [9].

При моделировании водохозяйственной модели результаты расчета должны быть получены в виде графиков (временных рядов) для различных элементов речной сети:

- для характерных точек – чистый приток, нераспределенная вода, приточность с предыдущего водосбора, водный баланс;
- для водопользователей – относительный дефицит, дефицит водопотребления, чистая приточность, отбор подземных вод, возвратный сток;
- для водохранилищ – суммарный пропуск в нижний бьеф, транзитный сброс, обязательный минимальный пропуск, обязательный максимальный пропуск, уровень воды, площадь зеркала, накопленный объем, потенциальная мощность, испарение, донная фильтрация, потери по длине;
- для речных участков – расход, потери на инфильтрацию, потери на испарение, глубина воды [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время система управления водораспределением на оросительных системах является малоэффективной и нерациональной, потому что практически не ведутся наблюдения за расходными характеристиками потока, а в связи с неудовлетворительным состоянием межхозяйственной и внутрихозяйственной сети это приводит к большим потерям воды. Применение современных средств компьютерного моделирования позволит эксплуатирующим организациям оптимизировать процесс водораспределения за счет детального моделирования работы регулирующих сооружений и комплексно анализировать водообеспечение как в рамках всей оросительной системы, так и ее отдельных частей.

Разработанные Рекомендации содержат описание методического подхода при использовании современных средств компьютерного моделирования для целей анализа эффективности водопользования, описание задач при гидродинамическом и водохозяйственном моделировании, требования к составу и структуре исходных данных для разработки цифровых компьютерных моделей, порядок операций, выполняемых при разработке цифровых компьютерных моделей, примеры решения оптимизационных водохозяйственных задач на оросительных системах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 MIKE 11: A Modelling System for Rivers and Channels. Reference Manual, DHI, August. – 2013.
- 2 MIKE 11: River and Channel Modelling, Short Introduction – Tutorial, September. – 2013.
- 3 MIKE 11: A modelling system for Rivers and Channels, User Guide, DHI, August. – 2013.
- 4 Презентационные материалы из курса обучения по использованию программы MIKE HYDRO Basin. – М., 2015.
- 5 Официальный сайт производителя программных комплексов MIKE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mikebydhi.com>, 2015.
- 6 The river management model MIKE BASIN [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dhigroup.com/upload/publications/mikebasin>, 2015.
- 7 MIKE HYDRO BASIN – River basin planning [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mikebydhi.com>, 2015.
- 8 Презентационный материал о ходе выполнения проекта «Создание гидравлических компьютерных моделей рек бассейна Ниды и выполнение расчетов прохождения дождевых осадков различной повторяемости» / ГК НКФ «Волга». – 2013.
- 9 Гидродинамическое моделирование в программе MIKE 11: портфолио проектов / ГК НКФ «Волга». – 2013 г.
- 10 Компьютерное моделирование водных систем и объектов: каталог программного обеспечения / ГК НКФ «Волга». – 2014.
- 11 Презентационные материалы из курса обучения по использованию программы MIKE FLOOD / ГК НКФ «Волга». – 2014.
- 12 Техническая спецификация на выполнение работ по проекту «Analiza zagrożenia powodziowego w zlewni Nidy» / Regionalny zarząd gospodarski wodney w Krakowi. – Краков, 2012.

13 MIKE HYDRO Basin Моделирование отбора воды для водопотребителей. Пошаговое руководство к началу работы / ГК НКФ «Волга». – 2014.

14 Демонстрационные примеры MIKE HYDRO Basin / ГК НКФ «Волга». – 2014.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Примеры решения оптимизационных водохозяйственных задач на оросительных системах

Решение оптимизационных задач выполнено с применением различных модулей программного комплекса цифрового компьютерного моделирования МІКЕ.

А.1 Распределение отборов воды в зависимости от приоритетности водопотребителей

Когда много потребителей осуществляют отбор воды из одного узла, может возникнуть нехватка. Одно из возможных решений – задание приоритетностей.

Водопотребителю, который имеет первый приоритет, будет подаваться вода до тех пор, пока его потребности не будут удовлетворены и всегда до какого-либо отбора воды другим водопотребителем, приоритетность которого определена как второстепенная (рисунок А.1).

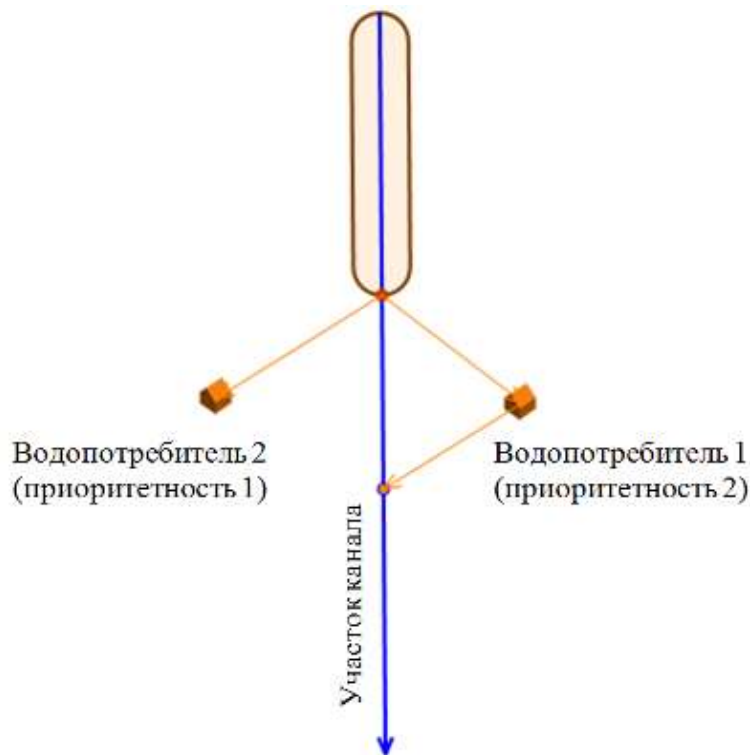


Рисунок А.1 – Расчетная схема водопотребления

Результаты моделирования представлены в виде графиков. На рисунке А.2 отображены графики водоподачи и водопотребления для каждого пользователя, которые позволяют проанализировать процесс распределения поступающего объема воды в источник водоснабжения между водопотребителями за определенный временной интервал. Согласно данному графику водопотребность водопользователя 2 выше нежели водопользователя 1.

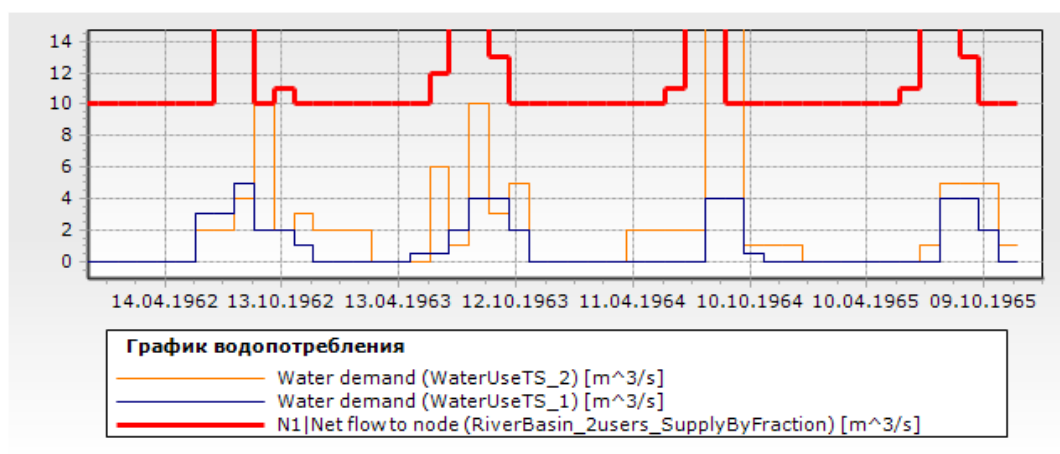


Рисунок А.2 – Графики водопотребления

На графике дефицита водопотребления (рисунок А.3) видно, что у водопотребителя с второстепенной приоритетностью наблюдается дефицит, в то время как у водопотребителя, имеющего первый приоритет, такого не наблюдается.

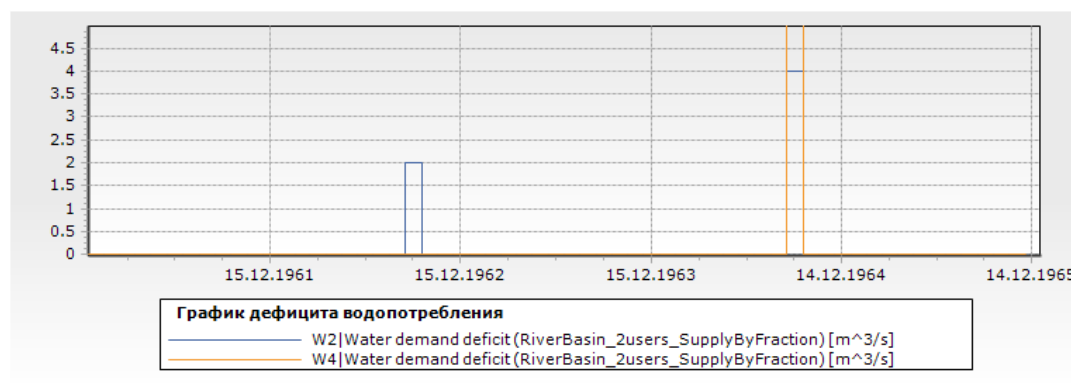


Рисунок А.3 – График дефицита водопотребления

В случае дефицита у обоих водопользователей в данном примере дефицит будет больше у водопотребителя 2, несмотря на его первостепенную приоритетность. Это происходит потому, что общий объем, поступающий в источник водоснабжения, не покрывает его потребности и дефицит, получа-

мый в результате расчета, будет больше чем у водопотребителя с второстепенной приоритетностью [14].

А.2 Подбор отметки затвора при переменных гидрологических условиях в канале

Одной из важнейших водохозяйственных задач является оптимизация процесса управления водораспределением на межхозяйственных и внутрихозяйственных каналах.

На рисунке А.4 представлены результаты тестовых расчетов на простой демонстрационной модели мелиоративного канала с использованием расчетного модуля управления сооружениями в программном комплексе МИКЕ 11.

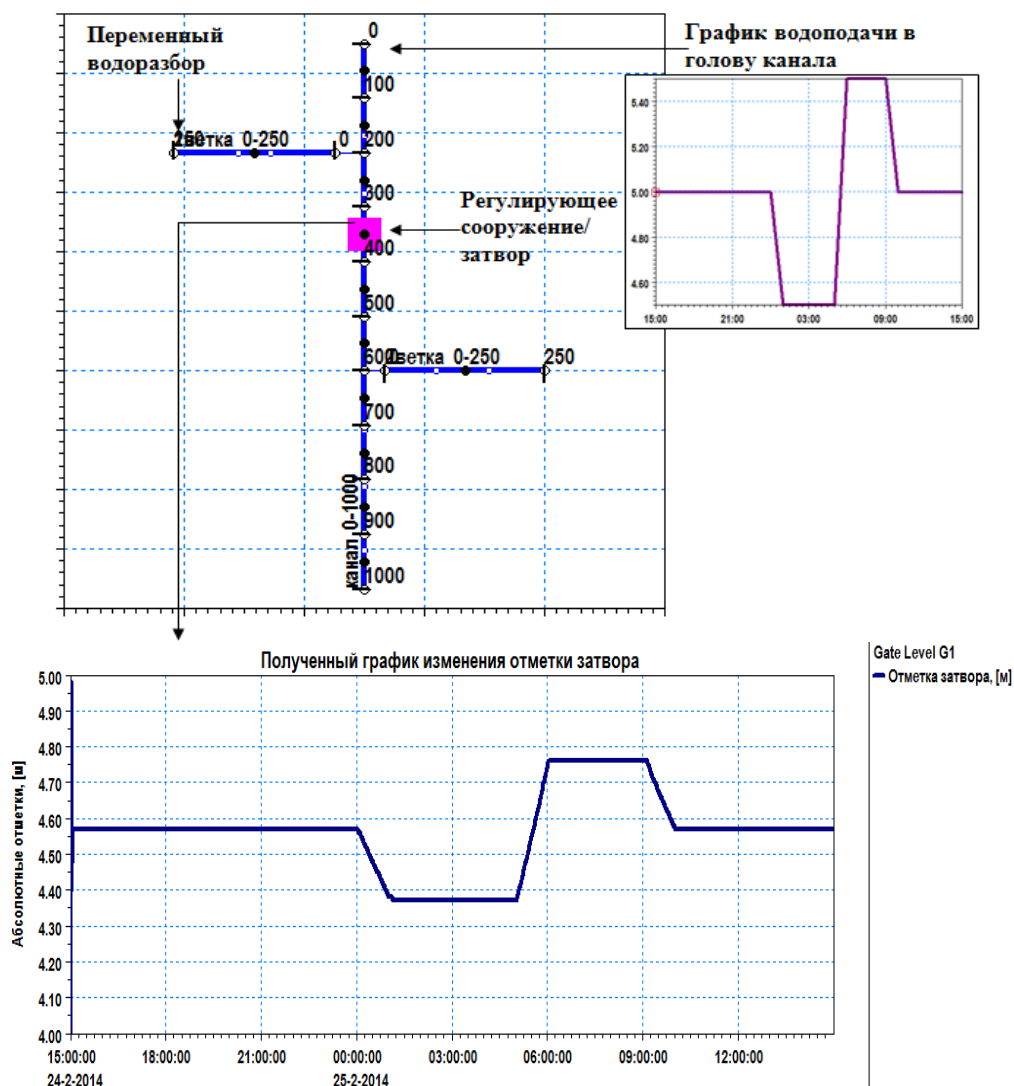


Рисунок А.4 – Модельный подбор отметки затвора

Цель расчета – подбор отметки затвора при переменных гидрологических условиях в канале, а именно: переменная водоподача в канал и переменная во времени величина водоразбора на распределительных каналах. Для простоты эксперимента канал принят призматическим трапецеидального сечения с постоянным уклоном, длина магистрального канала – 1000 м, на канале имеются два боковых ответвления – распределительные каналы. В створе ПК 350 м расположено сооружение с регулируемым затвором, истечение воды происходит из-под затвора. Задача моделирования – подобрать отметку затвора такой, чтобы в канале выше затвора выдерживался постоянный уровень воды на отметке $\nabla = 5,0$ м.