

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации

Департамент мелиорации

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

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ
КОМПЬЮТЕРНОГО ЦИФРОВОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ВЕСЕННИХ
Половодий (паводков) и оценки их влияния
на безопасность и техническое состояние
МЕЛИОРАТИВНЫХ ГТС**

Новочеркасск

2015

Методические указания по применению компьютерного цифрового моделирования гидродинамических процессов при прохождении весенних половодий (паводков) и оценки их влияния на безопасность и техническое состояние мелиоративных ГТС подготовлены сотрудниками ФГБНУ «РосНИИПМ»: кандидатом технических наук, Г. А. Сенчуковым; Т. С. Пономаренко; кандидатом сельскохозяйственных наук В. Д. Гостищевым; кандидатом технических наук А. С. Капустяном; кандидатом сельскохозяйственных наук, профессором Г. А. Сенчуковым; И. В. Клишиным; А. А. Кузьмичевым; Р. Ю. Сахаровым; А. В. Бреевой.

Методические указания по применению компьютерного цифрового моделирования гидродинамических процессов при прохождении весенних половодий (паводков) и оценки их влияния на безопасность и техническое состояние мелиоративных ГТС одобрены на заседании секции мелиорации Минсельхоза России 27 ноября 2014 года, утверждены и введены в действие приказом директора ФГБНУ «РосНИИПМ» № 16 от 3 апреля 2015 года.

Содержание

Введение.....	4
1 Основные понятия.....	5
2 Общие положения.....	6
3 Общее описание задач, решаемых с использованием цифровых компьютерных моделей гидродинамических процессов.....	7
3.1 Одномерное (1D) моделирование.....	7
3.2 Двумерное (2D) моделирование.....	10
3.3 Комплексное моделирование.....	12
4 Требования к программному обеспечению.....	14
5 Требования к составу и структуре исходных данных для гидродинамической модели мелиоративных гидротехнических сооружений.....	16
5.1 Характеристика исходных данных.....	17
5.2 Требования к заданию исходных расчетных данных модели	20
6 Требования к полевым изысканиям и камеральной обработке результатов полевых измерений.....	24
6.1 Инженерно-геодезические изыскания (ИГИ).....	24
6.2 Инженерно-гидрометеорологические изыскания.....	29
6.3 Цифровое картографирование.....	31
7 Требования к составу, структуре, функциональным возможностям модели и результатам моделирования.....	32
7.1 Состав гидродинамической модели.....	32
7.2 Функциональные требования к гидродинамическим моделям.....	33
7.3 Операции, выполняемые при разработке гидродинамической модели.....	42
7.4 Описание полной структуры гидродинамической модели...	49
7.5 Калибровка и верификация моделей.....	52
7.6 Требования к результатам моделирования.....	55
8 Порядок организации работ по моделированию гидродинамических процессов и требования к их результатам.....	59
Заключение.....	61
Список использованных источников.....	62

Введение

К полномочиям Департамента мелиорации Минсельхоза России отнесена подготовка планов неотложных инженерно-технических и организационных мероприятий по пропуску весеннего половодья и паводков (Положение о Департаменте мелиорации Министерства сельского хозяйства Российской Федерации (утв. Минсельхозом РФ 28 августа 2009 г.), п. 4.3.3).

Пропуск весенних паводков и половодий через ГТС всегда сопряжен с риском возникновения и развития гидродинамической аварии. Для объективной оценки последствий прохождения паводка через мелиоративные ГТС целесообразно применять системы цифрового гидродинамического моделирования, позволяющие оценить риск возникновения и последствия аварийных ситуаций.

Разработанные методические указания содержат основные требования к программному обеспечению, к составу и структуре исходных данных для гидродинамической модели мелиоративных ГТС, функциональные требования к гидродинамическим моделям, порядок организации работ по моделированию гидродинамических процессов и требования к их результатам.

Методические указания предназначены для научно-методического обеспечения водохозяйственных организаций, подведомственных Департаменту мелиорации Минсельхоза России, при подготовке планов инженерно-технических и организационных мероприятий (обоснование видов и объемов работ по ремонту и реконструкции ГТС с целью безаварийного пропуска паводков (половодий) на стадии предпроектных проработок) по пропуску весеннего половодья и паводков через мелиоративные ГТС.

1 Основные понятия

Гидродинамическая модель – компьютерная программа, работающая на отдельном компьютере, реализующая представление о гидротехническом сооружении или бассейне водного объекта в форме отличной от реальной, но адекватно, характеризующей гидродинамические свойства и динамику их изменения со временем.

Одномерное моделирование – компьютерное моделирование в русле водотока с целью изучения его динамических параметров (уровень, расход, скорость) и локализация потенциально возможных мест перелива через напорный фронт водоподпорных ГТС и определения отметок и возможных геометрических параметров возможных проранов.

Гидравлическая квазидвумерная модель – упрощенный инструмент моделирования потоков при взаимодействии «русло-пойма» в одномерной схематизации потока.

Двумерное моделирование – компьютерное моделирование течений водотоков в плановой схематизации с целью оценки параметров (площадь, скорость, глубина, продолжительность) затопления территорий.

Комплексное моделирование – компьютерное моделирование с использованием информационных ресурсов одномерной и двумерной моделей.

Расчетный участок – такой участок, для которого задается определенная закономерность изменения морфометрических и гидравлических характеристик на всем рассматриваемом протяжении канала или реки.

Гидрологическая модель – компьютерная модель, разрабатываемая для определения гидрографов приточности к моделируемому объекту при отсутствии исходной и сценарной гидрологической информации.

Морфоствор – поперечное сечение долины реки (канала) с геометрическими и морфометрическими его характеристиками, используемое для теоретического расчета скоростей течения и расходов воды.

Лицензиат – юридическое лицо или индивидуальный предприниматель, заключившие лицензионный договор (контракт) на осуществление конкретного вида деятельности или отчуждение объекта интеллектуальной собственности.

Официальный дистрибьютор – организация, осуществляющая продажу товаров, приобретаемых по договору с определенным производителем на долгосрочной основе. Дистрибьюторы обладают преимущественным правом и возможностями приобретать и продавать оборудование, технические новинки, программное компьютерное обеспечение.

Сублицензиат – юридическое лицо или индивидуальный предприниматель или частное предприятие, приобретшие у лицензиата в рамках настоящего договора простое неисключительное право на использование программного продукта либо программных продуктов (копии программного продукта либо копии программных продуктов) с правом его (их) коммерческого использования.

Программный продукт (копия программного продукта) – самостоятельное, отчуждаемое произведение, представляющее собой публикацию текста программы или программ на языке программирования или в виде исполняемого кода.

Дистрибутив – набор специальных файлов, содержащих отдельные части программного продукта.

Защитный ключ – представляет собой специально созданный для каждой копии программного продукта защитный программный код.

Файл лицензии – специально разработанный для каждой копии программного продукта защитный файл в формате *.dat, передаваемый конечному пользователю, сублицензиату посредством электронной почты либо, по просьбе сублицензиата, на информационном носителе.

Простое неисключительное право на использование программного продукта (копии программного продукта) – лицензия, предоставляющая право использования программного продукта (копии программного продукта), исключающее самостоятельное внесение в него изменений и его копирование (далее лицензия).

Коммерческое использование программного продукта (копии программного продукта) – использование сублицензиатом по своему усмотрению программного продукта (копии программного продукта), простое неисключительное право на который он приобретает, согласно настоящего договора, любым из разрешённых способов, прямо указанных в настоящем договоре, не исключая возможности получения сублицензиатом материальной выгоды (коммерческая лицензия).

2 Общие положения

Работы по разработке гидродинамической модели ГТС мелиоративного назначения выполняются на подготовительной (предпроектной) стадии с целью объективного инженерного и научного обоснования состава и объемов работ при разработке планов инженерно-технических и организа-

ционных мероприятий по пропуску весеннего половодья и паводков через мелиоративные ГТС.

Разработка гидродинамической модели ГТС мелиоративного назначения выполняется с использованием специализированного программного обеспечения семейства MIKE или аналогов, обладающих функционально схожим интерфейсом и инструментарием.

Разработка гидродинамической модели ГТС мелиоративного назначения выполняется на цифровой геоинформационной основе с использованием данных инженерно-геодезических измерений и инженерно-гидрометеорологических изысканий, выполненных в соответствии с требованиями действующих норм и правил.

Инженерные изыскания для обоснования и разработки компьютерной цифровой модели ГТС должны проводиться специализированными организациями, имеющими допуски саморегулируемых организаций к видам работ в области инженерно-геодезических и инженерно-гидрометеорологических работ [1].

Работы по разработке компьютерной гидродинамической модели ГТС мелиоративного назначения должны выполняться квалифицированными специалистами, имеющими инженерную и научную квалификацию и обладающими необходимыми навыками работы со специализированным программным обеспечением компьютерного гидродинамического моделирования.

3 Общее описание задач, решаемых с использованием цифровых компьютерных моделей гидродинамических процессов

3.1 Одномерное (1D) моделирование

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 предполагает усреднение расходов и скоростей по площади поперечного сечения. Необходимым условием для одномерного моделирования является предварительное задание пути следования воды (или потенциально возможного направления движения потоков).

Одномерная задача решается в том случае, когда процесс распространения воды в паводок или после прорыва или перелива через напор-

ный фронт не требует детальной проработки. Предпочтительная цель одномерного моделирования – это определение параметров водотока в русле и локализация потенциально возможных мест перелива через напорный фронт водоподпорных ГТС и определение отметок и возможных геометрических параметров возможных проранов.

Решение задачи определения растекания воды по пойменным территориям при одномерном моделировании также является потенциально возможным, однако является трудоемким процессом и имеет риск получения не вполне достоверных данных моделирования в случае допущения ошибки. Дело в том, что при решении одномерной задачи трудно заранее спрогнозировать трассы течений воды по поймам и прилегающим участкам, что является обязательным условием при одномерном подходе. В том случае, когда заранее не известно или трудно предсказуемо направление будущих потоков, потребуется более тщательное изучение рельефа потенциально затапливаемых территорий. Затем возможно создание так называемой квазидвумерной модели, где русловая и пойменная часть (и, вероятно, затапливаемая) описываются отдельными модельными участками со своими поперечными сечениями и гидравлическими характеристиками, а их гидравлическая связь осуществляется посредством специальных соединительных каналов, обеспечивающих возможность перетекания воды из русла на пойму и обратно (рисунок 1).

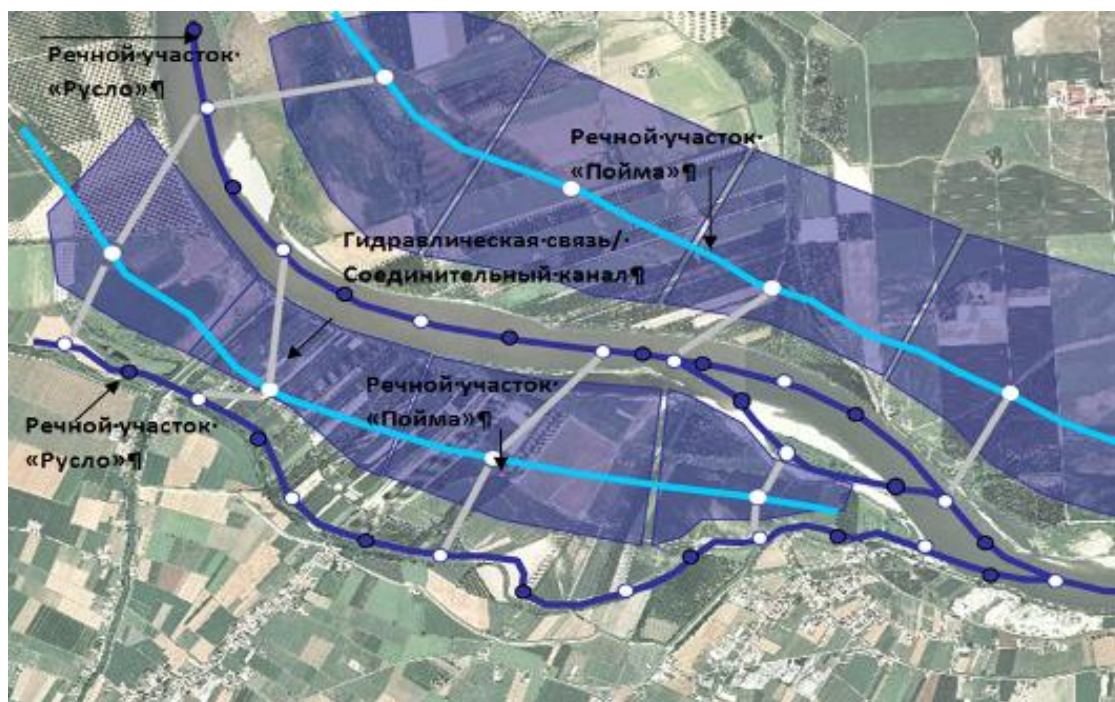


Рисунок 1 – Общее представление гидродинамической модели в квазидвумерной схематизации

К положительным моментам можно отнести высокую точность вычислений в руслах и возможность описывать ГТС любого назначения и компоновки, но при этом нет возможности учесть двумерные эффекты и достаточно трудоемко происходит процесс создания модели, так как увеличивается количество модельных участков и соединительных каналов.

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 речных или каналных систем.

Полученные данные позволяют выявить места перетекания паводковых вод через бровки русла реки или канала, а также через гребень дамб обвалований. Пример графического отображения мест перетекания по трассе канала приведен на рисунке 2.

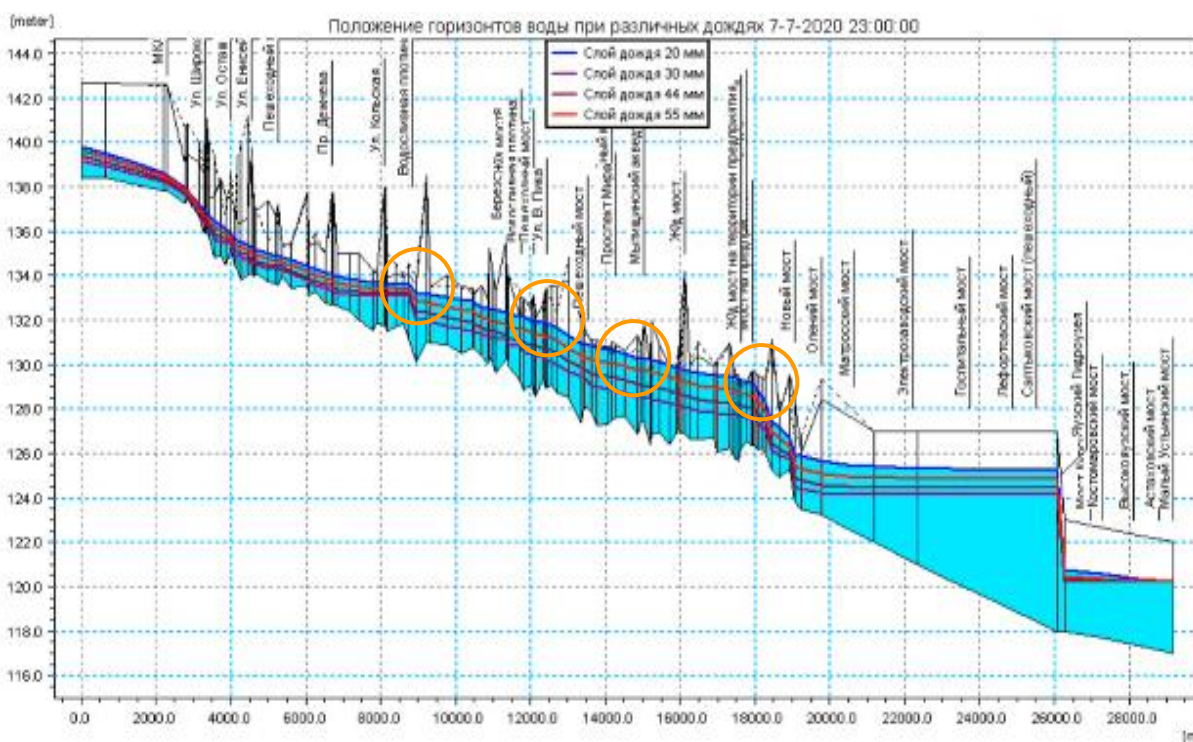


Рисунок 2 – Продольный профиль с определением вероятных мест перетекания воды через бровки канала

Если в ходе работ по решению одномерной задачи выявляются значительные (возможно даже превосходящие на порядок ширину русла реки) размеры затапливаемых пойм и прилегающих территорий, то в такой ситуации корректное описание водообмена между руслом и поймой приобретает решающее значение для определения максимальных уровней воды

и границ затопления территорий. В этом плане разумнее перейти от квазидвумерной схемы к полноценной комплексной 1D+2D схеме, реализуемой в программе MIKE FLOOD.

3.2 Двумерное (2D) моделирование

Двумерное моделирование решает задачу отображения течений в так называемой плановой или двумерной схематизации. При моделировании паводков и определения зон затопления не требуется задавать потенциальные трассы протекания воды, программа определит их автоматически, основываясь на данных о рельефе.

Технически модель описывает рельеф в виде сетки (ЦМР) с единым по всей моделируемой площади размером ячейки (рисунок 3).



Рисунок 3 – Общая схема модели в системе MIKE 21

Такая сетка называется классической или регулярной. В программах гидродинамического моделирования (в том числе и в семействе MIKE) существуют и нерегулярные сетки с возможностью описания ячеек разной формы и размеров, называемые также адаптивными, но моделирующие

системы с классической регулярной сеткой являются более бюджетными и не уступают по качеству результатов адаптивным.

Размер ячейки должен быть определен заранее и напрямую зависит от качества исходной информации (детальности имеющихся карт рельефа). На эту модельную сетку задаётся поступление расчетных гидрографов приточности (полученных из внешних источников или определенных заранее в модели формирования стока с водосборов). Далее эти расходы трансформируются, растекаясь по расчетной сетке-рельефу, с учетом областей различного типа землепользования (следовательно, и с различной шероховатостью территории) и имеющихся инфраструктурных объектов (насыпи, дороги и т. д.), пересекающих или препятствующих протеканию вод.

При таком двумерном подходе к моделированию зон затоплений, результаты моделирования получаются более точными и с лучшим разрешением (по сравнению с одномерной моделью) (рисунок 4).

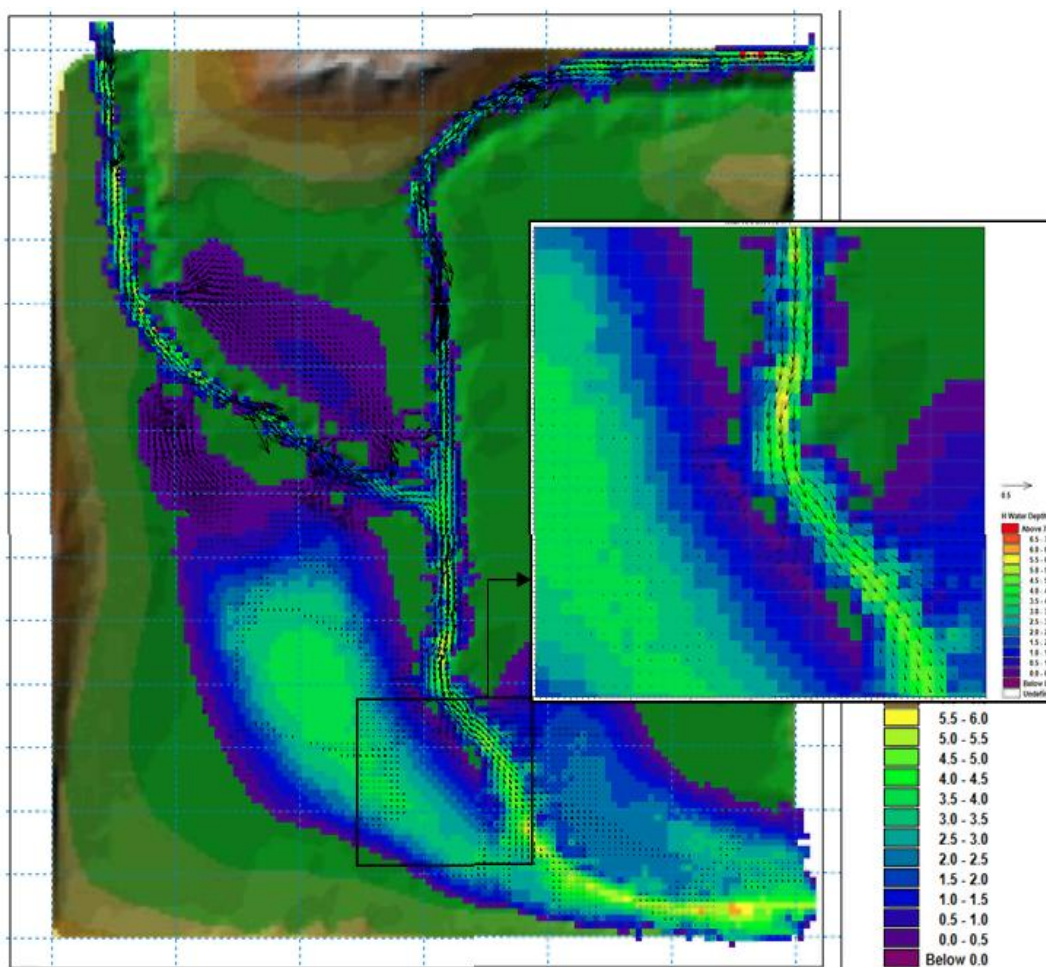


Рисунок 4 – Карта максимальных глубин и направлений течения

Следует отметить, что у двумерного моделирования речных затоплений есть две основные сложности. Во-первых, требуется значительно больше усилий и исходной информации, чтобы описать речные (канальные) русла в виде сетки. Сложность состоит в том, что для корректного и точного описания изменчивости донных отметок каналов, поворотов, разветвлений, меандр рек нужно формировать более плавную расчётную сетку. Для обеспечения такой плавности изначально необходимо устанавливать меньший размер ячеек сетки, что влечет за собой общее (порой значительное) увеличение количества расчётных точек, что сильно увеличит время обработки данных и время машинного счета модели. Во-вторых, на базе типовой сетки сложно описать различные водопропускные сооружения (например, мосты, трубчатые переходы в дорожных насыпях и т. д.). Особенно это касается сооружений, где геометрический размер водопропускных отверстий меньше, чем линейный размер расчётной сетки.

Задача двумерного моделирования также выполняется при необходимости оценки последствий гидродинамической аварии. При необходимости оценки площадей и границ затопления, времени добегания волны, оценки продолжительности половодья (паводка) задача двумерного может решаться при известных параметрах выхода вод (локация точек выхода, геометрические параметры и параметры излива).

3.3 Комплексное моделирование

Комплексное моделирование является наиболее трудоемким, но, в то же самое время, наиболее точным и информативным методом моделирования.

В системе MIKE для проектов моделирования затопления пойменных территорий от паводков или гидродинамических аварий применяется программный модуль MIKE FLOOD. Программа позволяет объединить гидравлические и информационные преимущества отдельных моделей: одномерной MIKE 11 и двумерной MIKE 21, избежав при этом сложностей при формировании моделей и неопределенностей каждой из них. Основным назначением программы является моделирование паводков различной обеспеченности и определение соответствующих границ затопления, а также глубин, скоростей течения и продолжительности времени затопления.

Основной принцип решения задачи комплексного моделирования заключается в том, что русловые, канальные части водной системы и все во-

допропускные сооружения, работающие по своим режимам и пропускной способности, описываются в одномерной схеме, а пойменные территории, с учетом особенностей местности и возможных инфраструктурных объектов, препятствующих свободному протеканию вод по пойме, задаются в двумерной плановой схематизации. Гидравлическое объединение этих отдельных моделей происходит посредством специальных вдольбереговых связей-соединений (рисунок 5). Эти связи прокладываются вдоль бровок канала или реки автоматически. Такая гидравлическая связка позволяет воде перетекать из русла на пойму и затем при возникающих подходящих условиях стекать обратно. Гидравлически эти связи представляют собой водосливы с возможностью работы в неподтопленном и подтопленном режимах. Одномерная и двумерная модели могут быть соединены между собой через отдельные расчетные точки или же непрерывно вдоль береговой линии.

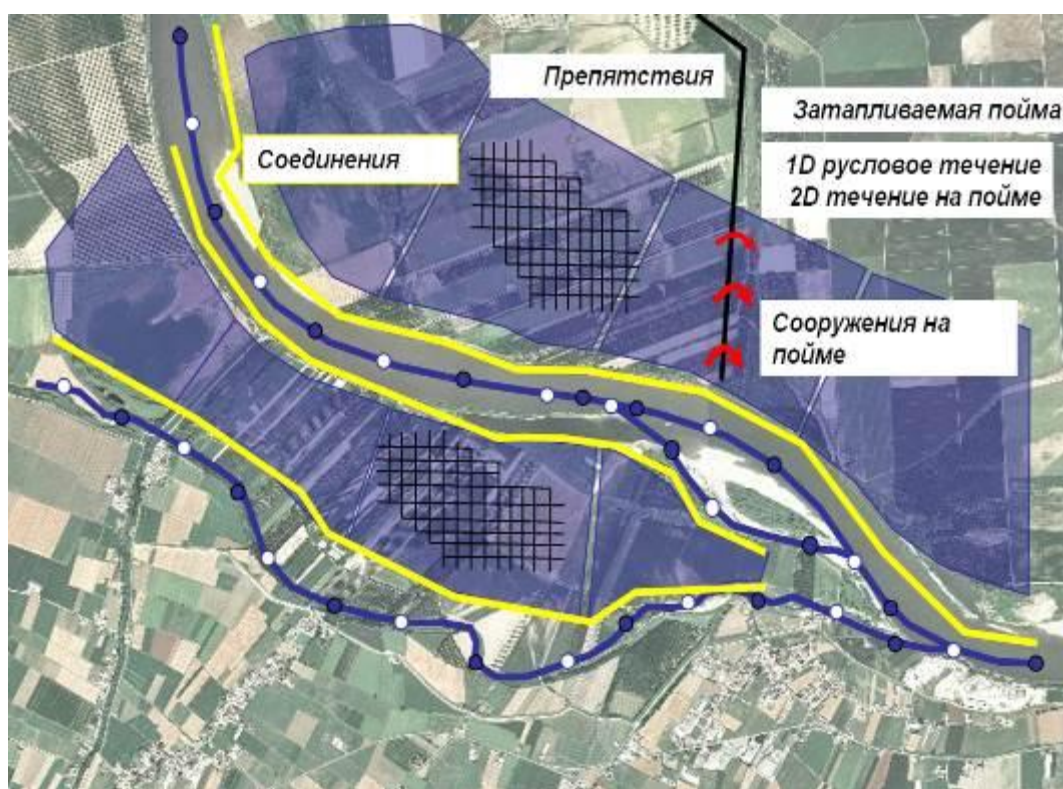


Рисунок 5 – Общая схема составления комплексной модели

Если на поймах присутствуют сооружения, ограничивающие свободное растекание вод по территории, например, мостовые переходы или насыпи с водопропускными сооружениями, то такие участки описываются в одномерной модели.

Такой подход необходим для качественного определения и описания пропускной способности этого ГТС. Связка одномерной и двумерной частей модели также производится посредством гидравлических соединений, расположенных сверху и снизу от самого сооружения.

Комплексная задача решается при необходимости детального анализа работы ГТС на заданном водосборе в условиях прохождения паводка (половодья), оценки рисков возникновения и последствий гидродинамических аварий, границ затопления прилегающих территорий и оценки продолжительности нахождения паводковых вод на пойменных территориях.

4 Требования к программному обеспечению

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

Программное обеспечение должно позволять осуществлять высокоточное цифровое моделирование течений в системах мелиоративных каналов, реках и пойменных территориях, а также моделирования затоплений при паводках, прорывах плотин и дамб обвалования, штормовых нагонных наводнениях.

Программное обеспечение должно обеспечивать решение следующих задач:

- моделирование процессов управления ГТС для целей безаварийного пропуска паводковых вод и минимизации ущербов для ГТС, населения и инфраструктурных объектов;
- проведение оценки работы ГТС и мелиоративных систем при различных эксплуатационных и гидрологических сценариях;
- выявление критических проблемных мест в каналах и речных системах, ограничивающих возможность безаварийного пропуска паводковых вод;
- определение мест планового расположения участков с перетеканием паводковых вод через дамбы обвалования речных и канальных систем;
- моделирование развития и последствий гидродинамической аварии;
- анализ и последствия любых паводков и наводнений различных обеспеченностей;

- картографирование зон затоплений, определение возможных ущербов;

- получение картины течений на прирусловых или пойменных участках рек и каналов, требующей детальной информации об уровнях воды, скоростях течения и о динамике водообмена между русловым потоком, второстепенными водотоками и пойменными областями;

- определение картины распространения волн прорыва напорного фронта плотин вниз по речной долине (или бокового прорыва дамб обвалований), имеющей сложную морфометрическую структуру;

- гидравлическое обоснование и оценка проектных предложений по реконструкциям объектов на водотоках, проведениям дноуглубительных работ или мероприятий по увеличению пропускной способности рек, каналов и сооружений, 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);

- разработка инженерно-технических мероприятий по устранению (или снижению вероятности) аварийных ситуаций;

- разработка экономически эффективных планов по смягчению последствий половодий (паводков).

Программный комплекс должен иметь моделирующие и иные инструменты, позволяющие:

- динамически интегрировать одномерную систему для моделирования рек и каналов и двумерную систему для моделирования плановых течений в водных объектах;

- описывать различные ГТС, их пропускную способность и режимы работы в русловых и пойменных частях моделируемой системы;

- одномерная система для моделирования рек и каналов должна быть на русском языке.

Программное обеспечение должно выполнять моделирование следующих процессов:

- затопления и осушения территорий, в том числе при географически совпадающих речных паводках и морских нагонных наводнениях, а также при гидродинамической аварии;

- картины течений на прирусловых (пойменных) участках рек, требующей детальной информации об уровнях воды и скоростях течения;

- динамики водообмена между русловым потоком, второстепенными водотоками и пойменными областями.

Программный комплекс должен быть сертифицирован по системе сертификации ГОСТ Р и соответствовать требованиям нормативных документов: ГОСТ 34.201-89 (разд. 1), ГОСТ 28195-89 (табл. 1, пп. 1, 3, 4, 5, 6), ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93 (разд. 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 инструменты импорта (экспорта) 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.

Должно быть обеспечено оказание услуг по обучению и консультированию сотрудников сублицензиата на их рабочих местах.

5 Требования к составу и структуре исходных данных для гидродинамической модели мелиоративных гидротехнических сооружений

Состав, структура, объем и точность исходных данных для разработки компьютерной цифровой модели гидродинамических процессов в расчетных створах ГТС зависят от задачи моделирования, технических и эксплуатационных характеристик ГТС, гидрологических и топографических условий. В каждом конкретном случае состав и объемы исходных данных могут быть различными и должны уточняться и конкретизироваться в техническом задании на разработку цифровой гидродинамической модели в заданных створах ГТС.

5.1 Характеристика исходных данных

Задание расчетных параметров для расчетов неустановившегося движения воды в реках и каналах должно производиться на основе имеющихся натуральных материалов (данных). Исходные данные можно разделить на топографические, морфометрические, гидрологические и гидротехнические.

Топографические данные дают общее понимание о моделируемом объекте, представляют описание геометрии моделируемой речной системы, её протяженности, местах присоединения притоков, разветвлений, излучин, расположении ГТС и иных сооружений, определяют места изменения характерных ширин водотоков. Базируясь на топографической информации, также назначаются створы для последующего задания поперечных сечений. На основе этих данных разрабатывается топология модели:

- выделяются пойменные фрагменты;
- устанавливаются излучины, разветвления русла, старицы;
- характерные створы, где должны быть расположены расчетные точки;
- границы между главными руслами и поймами и т. д.;
- определяется местоположение ГТС.

Морфометрические данные представляют собой описание геометрии русла и поймы реки или канала в виде поперечных разрезов. Они включают в себя описание формы, размеров и высотных отметок.

На основе этих характеристик рассчитывается:

- пропускная способность во всех створах реки или канала;
- пикетаж;
- непосредственное описание сечения в виде таблицы «расстояние-отметка»;
- данные об изменчивости шероховатости по глубине или ширине сечения (информация о слагающем грунте, степени зарастания или замусоренности).

Гидрологические данные включают:

- водомерные графики и гидрографы;
- записи приливных характеристик;
- измерения уровней, расходов и скоростей;
- отметки максимальных паводков;
- кривые расходов;
- границы и глубины затопления;

- другое.

Эти данные служат двум целям:

- установлению граничных условий модели;
- калибровке модели.

Гидротехнические данные – сведения о ГТС, их назначениях, об отметках уровней воды в водохранилищах, о составе сооружений гидроузлов, о типе и характеристиках водосбросов, о графиках работы гидроэлектростанций. Эти данные должны давать полное описание геометрических, гидравлических и режимных характеристик сооружения.

Для некоторых моделей необходимы дополнительные данные. Например, для моделей приливных рек могут потребоваться данные о распределении солености вдоль реки с целью использования их при калибровке модели, оценке, сфере ее применимости и эксплуатации.

Для калибровки моделей размыва важны данные о расходе наносов и деформациях русла реки (отложения или размыв), а также обычные топографические и гидравлические характеристики, необходимые для моделей распространения паводка.

Конкретный состав и точность данных зависят от:

- поставленной задачи;
- специфики объекта;
- характера неустановившегося движения;
- принятого метода расчета;
- нужной точности решения задачи.

Для модели прогноза паводка или распространения волны прорыва плотины точность и детальность исходных данных должны быть очень высокими. Если же модель будет использована для исследования развития бассейна, когда оперируют отдельными участками площади порядка 1000 км², то требования к точности и детальности информации будут менее строгими.

Не существует значительных различий между требованиями к исходным данным моделей волны паводка и волны прорыва плотины: для обоих типов задач требуется значительный объем данных. Небольшие расхождения в требованиях к исходной информации могут заключаться в объеме необходимых гидрологических данных (измеренные уровни и расходы). Как правило, в задачах расчета паводков и соответствующих границ затопления требуется рассмотреть несколько расчетных сценариев (паводков разной обеспеченности). Для этого, зачастую, может потребоваться калибровка на разные повторяемости паводковых событий (от малых обес-

печенностей до паводков редкой повторяемости) для проверки правильности и адекватности модели на разные расчетные случаи. При моделировании волн прорыва для калибровочных расчетов необходимо и достаточно использовать данные только максимально наблюдавшихся паводковых событий, т. к. малые паводки для такой задачи непрезентативны.

В расчетные параметры исходных данных для большинства методов входят:

- топографические данные;
- длины расчетных участков;
- значения расчетных временных интервалов и шагов моделирования;
- обобщенные морфологические характеристики русла (аккумулирующие емкости, положение линии дна, принятое в расчете);
- характеристики гидравлических сопротивлений;
- начальные и граничные условия;
- боковой приток и отток.

Топографические данные, используемые для построения математических моделей рек и каналов, можно разделить на две основные категории: качественные и количественные.

Качественные данные используют для ознакомительного описания реки, ее притоков и пойм. Сюда входят:

- физико-географические условия, которые определяют различные фазы развития паводка;
- наличие в пойме берм, дамб обвалования, мест образования промоин, дорог на повышенных отметках, местных препятствий в пределах затопляемых зон и т. д.

Данные качественного характера можно получить из:

- полевых обследований;
- аэрофотоснимков и фотоснимков из космоса;
- опросов и публикаций.

Основная задача при получении данных – выявить общий характер фаз паводка в моделируемой зоне с тем, чтобы суметь рационально расположить фрагменты, расчетные точки, ГТС и другие элементы модели.

Количественные топографические данные необходимы для воспроизведения модели реки и ее пойм. Существуют четыре основных фактора, которые в ходе моделирования потока зависят непосредственно от топографических характеристик:

- направления течения потока (зависящие от изменения расходных характеристик, отметок промоин, дамб и дорог);
- скорость движения волн (зависящая от геометрических характеристик поперечных сечений и шероховатости);
- формируемые уровни воды в русле и на пойме (зависящие также от размеров сечений и от шероховатости);
- объем воды, аккумулируемый системой.

Соответственно необходимы четыре вида количественной топографической информации, которые можно получить с крупномасштабных карт либо путем специальных изысканий:

- продольные профили вдоль берегов, дамб, дорог и т. д.;
- поперечные сечения водотока;
- карты с нанесением типов землепользования для определения и значений шероховатостей по длине моделируемого участка;
- контурная схема затопляемой территории.

5.2 Требования к заданию исходных расчетных данных модели

Требования к исходным расчетным данным гидродинамической модели должны содержаться в техническом задании на производство работ по цифровому моделированию.

Как правило, задание расчетных параметров начинается с разбивки участка канала или реки на расчетные участки на основании рассмотрения топографических и гидрометрических материалов. При разбивке рекомендуется руководствоваться следующими общими принципами:

- характерные сечения должны располагаться в местах существенного изменения ширины сечения, уклона, а также шероховатости ложа канала или реки для того, чтобы было возможно интерполировать линейно линейные характеристики;
- в пределах участка не должно быть резкого (ступенчатого) изменения глубины или ширины русла;
- при резко выраженном неустановившемся движении в створе возмущения (например, в случае расчета волн попусков) целесообразно назначать длину участков вблизи этого створа в несколько раз меньшей, чем вдали от него (в зонах меньшей нестационарности течения);
- в створе впадения притоков, которые заметно изменяют расход реки, обязательно назначаются границы участков. То же относится к створам

гидроузлов, крупным водозаборам и сбросам, створам установки расходомеров, мостов и т. д.;

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

При разбивке расчетного протяжения реки на участки следует также руководствоваться требованиями выбранного расчетного метода (в соответствии с расчетной схемой). Детальность описания явления, получаемая в результате расчетов, может быть повышена за счет разделения расчетных участков на более мелкие шаги по длине.

Расчетные шаги по длине, как и расчетные участки, должны выбираться меньшими в зонах более резко выраженного неустановившегося режима, например, вблизи ГЭС. Целесообразно выбирать шаги малыми в местах, где свободная поверхность воды имеет значительную кривизну, на сильно выраженных кривых спада, так как здесь могут появляться «пилообразные» колебания расхода и уровня от точки к точке, имеющих чисто разностное происхождение и не отражающих физики явления.

Выбор расчетного интервала времени определяется как нестационарностью явления, отражаемой, в основном, характером гидрографа во входном створе, так и требованиями метода расчета. Рекомендуется выбирать не слишком большое значение, чтобы в течение расчетного интервала времени изменение расходов и уровней можно было в первом приближении считать линейными.

Основные морфометрические характеристики русла – продольные профили, поперечные сечения и карта затопляемых территорий.

В модели вводятся характерные поперечные сечения для границ расчетных участков. Профиль дна задается в пределах расчетного участка прямолинейным (или в виде ломаной линии, если это допускается алгоритмом расчета):

- должны быть построены продольные профили пойменных берегов, главной реки и притоков, а также продольные профили берегов главного русла (раздел между главным и пойменным руслами);

- должны быть составлены и увязаны с продольными профилями пойменных берегов сечения поперечных дорог и дамб. Все значительные промоины и сооружения, а также понижения в дамбах, берегах и дорогах должны быть описаны достаточно подробно, с тем, чтобы для них на модели можно было назначить соответствующие ширины и отметки перелива и коэффициенты расхода.

Масштаб измерений для построения поперечных сечений должен быть достаточным, чтобы все потенциально затопляемые участки поймы были включены в модель. Поперечные сечения русел рек желательно строить на более или менее равных расстояниях друг от друга, за исключением случаев, когда определенные характеристики долины требуют неравномерного размещения профилей. Среднее расстояние между поперечными профилями (или сечениями) зависит от требуемой точности модели и крутизны уклона долины; порядок величин – от 500 м до 10 км. Необходимо иметь также поперечные сечения по притокам, включаемым в модель.

Необходимы поперечные сечения главного русла при среднем расстоянии между ними, зависящем от цели моделирования; интервал – от 200 до 5000 м. Эти поперечные сечения надо располагать так, чтобы были отражены характерные элементы канала или реки. В местах наличия сооружений потребуются более частая расстановка поперечных сечений (для более точного вычисления расхода, проходящего через сооружение), как минимум потребуются описание сечения выше и ниже по течению от свора ГТС. Эти поперечники рекомендуется назначать на расстоянии двух–пяти ширин водопропускного сечения сооружения.

Для определения объемов аккумуляции воды на поймах, моделируемых как двумерные зоны, недостаточно иметь лишь продольные и поперечные сечения. При моделировании зон затопления в виде сети взаимосвязанных фрагментов следует для каждого фрагмента установить не только отметки дамб, дорог и других естественных границ фрагмента, но и установить кривую зависимости объема от отметки воды. Для построения этой кривой, за исключением случаев горизонтальности дна и полной оконтуренности фрагмента дамбами, требуются карты, причем вертикальный и горизонтальный масштабы должны соответствовать требуемой точности модели. При расстоянии между центрами фрагментов от 500 м до 10 км могут применяться карты с горизонтальным масштабом 1:20000–1:50000. Для удовлетворения точности, обычной для моделирования отметок водной поверхности (от 15 до 50 см), необходимо иметь сечения горизонталями через 1 м и менее, для чего следует использовать карты масштаба крупнее 1:10000 или выполнять детальные наземные съемки.

При расчетах как установившегося, так и неустановившегося движения воды гидравлические сопротивления характеризуются коэффициентом Шези или Маннинга. При наличии материалов натуральных наблюдений можно определять коэффициент шероховатости русла, производя расчет

по кривым расходов, являющимся характеристикой пропускной способности русла в данном створе.

Граничные условия определяют распределение параметров потока на граничных участках. Они всегда однозначны и определяются постановкой задачи. Выделяют внешние граничные условия – на верхнем и нижнем конце участка реки и внутренние граничные условия – места прихода боковых расходов или створы гидротехнических сооружений. Типичными граничными условиями при расчетах течения в реках и каналах являются:

- на верхней (левой) границе – в начальном створе:

- 1) постоянный расход (если имеет место истечение из водоема);
- 2) гидрограф стока для определенного случая;
- 3) в створе ГЭС по графику изменения мощности во времени пересчитывается гидрограф;
- 4) в некоторых случаях (при расчетах волн паводка и половодья) задается ход изменения уровней;

- на нижней (правой) границе – в конечном створе:

- 1) постоянный уровень воды (случай впадения реки или канала в море, озеро или водохранилище, где колебания вод могут быть незначительными);
- 2) временные серии уровня воды или гидрограф (приливно-отливный цикл, сгонно-нагонные явления, известная работа водоема – сработка водохранилища);
- 3) надежная и однозначная кривая зависимости между расходами и уровнями.

Начальные условия при расчетах нестационарного течения соответствуют данным о расходах и уровнях воды в начальный период времени.

Боковой приток – положительный или отрицательный (отток) может быть задан в двух видах: сосредоточенный и распределенный. Сосредоточенный боковой приток (отток) задается в одном створе канала или реки. Положительный сосредоточенный приток имеет место в створах впадения рек-притоков в основную реку, а также сбросов каналов. Сосредоточенный отток имеется в виде расхода забора воды. Распределенный приток схематизирует сток воды в основное русло с маленьких речек и ручейков или сток с неосвещенной площади водосборных бассейнов. Распределенный отток может характеризовать собой разгрузку в грунтовые воды.

6 Требования к полевым изысканиям и камеральной обработке результатов полевых измерений

Исходными данными для разработки компьютерной цифровой модели гидродинамических процессов в расчетных створах ГТС являются материалы актуальных инженерно-геодезических и инженерно-гидрометеорологических изысканий. В каждом конкретном случае состав и объемы изыскательских работ могут быть различными, что зависит от технических особенностей объектов моделирования и задач, решаемых разрабатываемой моделью. Состав и объемы работ должны быть отражены в техническом задании на изыскания.

6.1 Инженерно-геодезические изыскания (ИГИ)

Инженерно-геодезические изыскания (ИГИ) проводятся для того, чтобы получить достоверные сведения о рельефе местности, геометрических параметрах ГТС, уклонах русел каналов и рек, а также прочих планировочных элементах.

Инженерно-геодезические изыскания следует проводить по всей протяженности моделируемого сооружения или его участка с включением в программу изысканий съемку прилегающей территории при разработке двумерной модели. При разработке одномерной модели достаточным будет проведение геодезических измерений водопроводящей части ГТС, включающую в себя съемку русел и дамб. При этом съемка прилегающей территории выполняется в минимально необходимом для моделирования объеме либо может не выполняться.

Для отображения топографической основы прилегающих территорий могут использоваться существующие топографические карты, а также существующие фотоматериалы аэрокосмической съемки.

Порядок проведения инженерно-геодезических изысканий, а также требования к используемым методам измерений и используемым средствам измерений определяются в соответствии с действующими нормативными и законодательными актами РФ [2–10].

Масштаб съемки объектов мелиоративного и гидротехнического назначения для целей проектирования (моделирования) принимается в соответствии с ВСН 33-2.1.07-87 [7]. Это, как правило, масштабы М 1:2000 (1000). При создании моделей на большие площади для предварительного

получения укрупненных результатов моделирования может быть использован менее детализированный масштаб М 1:10000.

Так как моделирование производится в цифровом формате, то требования к высоте сечения рельефа не предъявляются.

По результатам, полученным в ходе инженерно-геодезических изысканий, обосновываются планово-высотные параметры, и создается топографическая основа цифровой модели, а также получаются геодезические данные, необходимые для производства гидрометеорологических изысканий [11].

Геодезической основой при производстве инженерно-геодезических изысканий служат пункты государственных геодезических сетей (плановых и высотных), в том числе пункты спутниковых геодезических определений координат. В случае необходимости осуществляется устройство дополнительных пунктов опорной геодезической сети [7–10].

Для создания гидродинамических моделей гидромелиоративных систем (каналов и сооружений на них), как правило, требуется проведение крупномасштабных съемок на значительных территориях. Для выполнения таких работ на качественно высоком уровне и в минимальные сроки целесообразно использовать современные высокотехнологичные методики, приборы и оборудование.

Лидирующие позиции в определении координат занимают системы, использующие глобальные навигационные спутниковые системы (GNSS – Global Navigation Satellite System), к которым относятся GPS, Глонасс, Галилео.

Общие требования и методики к определению координат с использованием GNSS технологий подробно изложены в нормативно-технической литературе [12–17].

Проведение инженерно-геодезических изысканий можно разделить на подготовительный, полевой и камеральный этапы:

- подготовительный этап:

1) разработка технического задания на изыскания;

2) сбор и обработка результатов инженерно-геодезических изысканий прошлых лет;

- полевой этап:

1) рекогносцировочные обследования территории и (или) акватории изысканий;

2) создание планово-высотных (опорной и съемочной) геодезических сетей;

3) проведение полевых геодезических и (или) гидрографических измерений;

- камеральный этап подразумевает окончательную обработку полевых материалов, оценку их достоверности и точности, создание цифровой топографической модели русел водных объектов, гидротехнических сооружений и прилегающей местности, а также составление технического отчета.

При камеральной обработке целесообразно использовать цифровые системы обработки исходных геодезических данных, позволяющих осуществлять автоматический импорт, полученных топографических планов и профилей непосредственно в программную среду моделирования.

В ходе работ по созданию топографической основы для разработки компьютерной цифровой модели гидродинамических процессов в расчетных створах ГТС могут проводиться инженерно-гидрографические работы.

К инженерно-гидрографическим работам в т. ч. относятся:

- русловые съемки;
- промеры глубин (включая их высотное обоснование);
- нивелирование водной поверхности;
- связи уровней воды;
- обследование подводных препятствий.

Оптимальным способом измерения глубин при инженерно-гидрографических изысканиях является промер эхолотом с цифровой записью глубин на электронный носитель, непрерывно регистрирующим профиль дна по Галсу с возможностью синхронного определения координат, используя глобальные навигационные спутниковые системы.

Топографическая основа гидродинамической модели описывается поперечными сечениями русловой и пойменной частей. При решении задачи одномерного моделирования для некоторых случаев может быть достаточным проведение геодезической съемки только в русловой части моделируемого водотока. Для большинства одномерных и квазидвумерных задач сечения должны охватывать и русловую и пойменную части. При решении задачи двумерного или комплексного моделирования, поперечные сечения должны охватывать всю долину моделируемого участка канала или реки. Часть сечения долины, относящуюся к руслу водотока, нужно измерить геодезическими методами на местности, а часть, относящуюся к пойменным террасам, можно отобразить (сгенерировать) на основе имеющихся топографических карт и цифровых моделей рельефа (ЦМР).

Во всех случаях целесообразно геодезические измерения выполнять

таким образом, чтобы помимо самого русла водотока они также охватывали полосу рельефа шириной примерно 10–20 м направо и налево от верхнего края берегового откоса русла. Такой способ выполнения сечений русла позволяет в случае необходимости объединить их сечениями для пойменных террас, сгенерированными на основе ЦМР, в результате чего будут получены сечения долин, что является основой двумерного моделирования.

Расстояния между сечениями русла выбираются из условий обеспечения максимальной адекватности цифровой модели. Расстояния между поперечными сечениями назначаются в зависимости от протяженности моделируемого водотока и задач решаемых в ходе моделирования. На русловых участках расстоянием свыше 20 км сечения русла могут размещаться на расстоянии не более 1000–500 м, считая по длине водотока, и располагать перпендикулярно его оси. Дополнительно на русловых участках менее 20 км, в зависимости от задач моделирования и морфологии русел, расстояние между створами поперечных сечений может назначаться на расстояния от 100 до 500 м.

Сечения через пойменные террасы, которые будут генерироваться на основе ЦМР, необходимо размещать перпендикулярно к главному направлению течения долины, то есть перпендикулярно к горизонталям на главных откосах, ограничивающих долину водотока с его правой и левой стороны (в соответствии с рисунком 6). В случае водотоков с обвалованиями сечения через пойменные террасы необходимо продлить до гребня обвалований.

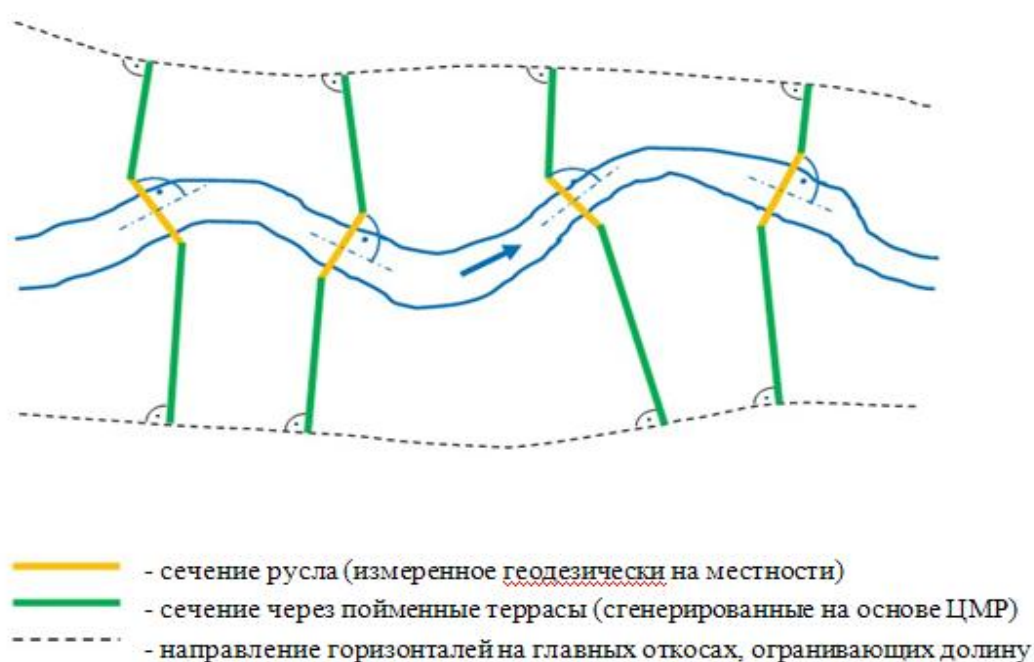


Рисунок 6 – Схема создания сечений через пойменные террасы

Для сечений русла нужно выбирать характерные места, то есть представительные для отрезка русла ниже и выше сечения (необходимо учитывать изменчивость формы русла, наклоны и материалы дна). Необходимо избегать расположения сечений в местах резких изменений направления потока воды (острые излучины, меандры и т. п.).

Сечения русла должны как можно точнее отражать форму русла водотока. Недопустимо отображение русла с помощью трех точек (берег, дно, берег), а также искусственно упрощать его геометрию до трапециевидального сечения.

Геодезические измерения для сечений русла должны выполняться от левой к правой стороне, если смотреть по направлению течения водотока. Все геодезические измерения высот следует выполнять в Балтийской система высот (БСВ).

Целесообразно в отчет о инженерно-геодезических изысканиях включать табличное отображение на листе Excel кодировки поперечных сечений в соответствии с примером, приведенным в таблице 1.

Таблица 1 – Табличное отображение на листе Excel кодировки поперечного сечения

Номер створа (пикет)	X (Расстояние, м)	Y (Отметки, м)
		0
	23,2	34,17
	26,7	32,44
	48	27,29
	83	27,17
	97	30,67
	104	34,17
	110	34,17
	112,8	32,59
	132,8	32,59

Такая кодировка позволят автоматизировать процесс кодировки поперечных сечений русла путем импорта из Excel в программную среду моделирования (рисунок 7).

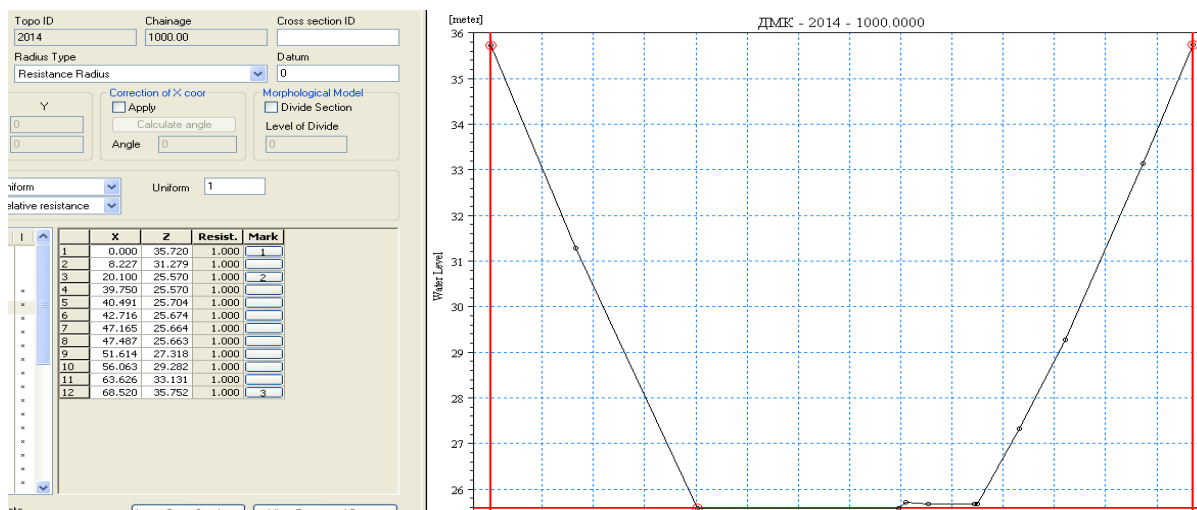


Рисунок 7 – Автоматическое построение поперечного профиля сечения русла канала

Отчет об инженерно-геодезических изысканиях должен быть выполнен в соответствии с утвержденными государственными нормами и требованиями и должен быть представлен в печатной и электронной версиях. В отчете целесообразно представить чертежи всех сечений русла и (или) долины (т. е. соединенных сечений русла с сечениями через пойменные террасы). Сечения долины нужно пронумеровать в соответствии с нумерацией сечений русла.

В результате проведения инженерно-геодезических и (или) инженерно-гидрографических изысканий для разработки компьютерной цифровой модели гидродинамических процессов в расчетных створах ГТС должны быть получены актуальные и объективные геодезические планово-высотные параметры моделируемого ГТС (поперечные и продольные створы) или водного объекта.

Контроль и оформление полученных материалов осуществляют в соответствии с действующими нормативно-техническими документами [18, 19].

6.2 Инженерно-гидрометеорологические изыскания

Основные задачи проведения инженерно-гидрометеорологических изысканий для целей компьютерного цифрового моделирования в зависимости от конечных задач моделирования могут включать в себя изучение и оценку эксплуатационных гидрологических режимов работы ГТС, комплексное изучение гидрометеорологических условий режимов территорий

и природных водных объектов, оказывающих влияние на исследуемое ГТС.

Порядок проведения инженерно-гидрометеорологических изысканий, а также требования к используемым методам проведения работ и используемым средствам измерений определяются в соответствии с действующими нормативными и законодательными актами РФ [2–11].

Инженерно-гидрометеорологические изыскания для целей компьютерного цифрового моделирования включают в себя следующие работы:

- подготовка технического задания на изыскания;
- сбор и проведение анализа архивных материалов и материалов отчетности служб эксплуатации;
- проведение полевых гидрометеорологических наблюдений;
- изучение гидрометеорологических явлений и процессов, которые несут потенциальную опасность;
- проведение камеральных работ, включающих в себя необходимые расчеты и написание технического отчета.

Источниками получения архивных гидрометеорологических данных могут быть территориальные органы Росгидромет, материалы эксплуатационных гидрометрических наблюдений, материалы научных и проектных водохозяйственных организаций, материалы наблюдений гидрометрических постов.

В процессе изыскательных работ проводятся рекогносцировочные обследования района изысканий, проводятся инструментальные наблюдения за гидрологическим режимом и замеры моделируемого гидротехнического сооружения. В случае необходимости осуществляются гидрометрические наблюдения в расчетных створах моделируемого гидротехнического сооружения.

В ходе инженерно-метеорологических изысканий для расчетных створов, как правило, необходимо получить следующие данные:

- расходы и уровни в расчетных створах с вероятностью превышения стока ($P_{\%} = 50$, $P_{\%} = 20$, $P_{\%} = 10$; $P_{\%} = 5$; $P_{\%} = 2$; $P_{\%} = 1$, а также $P_{\%} = 0,5$);
- гидрографы расходов половодья;
- кривые интенсивности расхода за период, соответствующий паводкам (половодьям);
- кривые $Q(H)$, $Q(t)$, $H(t)$ для створов ГТС.

В результате проведения инженерно-гидрометеорологических изысканий должны быть получены в достаточном объеме актуальные и объек-

тивные данные для цифрового моделирования, отражающие гидрологический режим в расчетных створах моделируемого ГТС.

6.3 Цифровое картографирование

Цифровое картографирование – это комплекс мероприятий, направленных на создание цифровой картографической продукции [20]. Цифровое картографирование является основным методом создания геодезической основы гидродинамической модели.

Построение гидродинамических моделей мелиоративных систем и ГТС может быть реализовано на базе как программной среды МИКЕ, так в других программах, отвечающих требованиям к гидродинамическому моделированию. При этом возможно комплексное решение задачи, при котором цифровая топографическая карта (ЦТК) создается в одной программной среде и посредством импорта передается в специализированную среду моделирования гидродинамических процессов другой программы.

Основные требования к процессу создания цифровых топографических карт устанавливает целый ряд документов [20–28].

При построении гидродинамических моделей мелиоративных систем и ГТС возникает необходимость в создании ЦТК.

Согласно ГОСТ Р 51605-2000 [21], ЦТК должны содержать все объекты, соответствующие их масштабу и состоянию описываемой ими местности.

Цифровое описание объектов ЦТК должно включать в себя:

- идентификатор объекта;
- семантику объекта;
- метрику объекта.

Информация о характерных элементах должна храниться в одном слое, т. е. объекты ЦТК должны принадлежать одному из следующих элементов содержания ЦТК:

- математическая основа;
- опорные пункты;
- рельеф суши;
- гидрография и ГТС;
- населенные пункты;
- промышленные, сельскохозяйственные и т. п. объекты;
- дорожная сеть и дорожные сооружения;
- растительный покров и грунты;

- границы, ограждения и прочие объекты;
- подписи собственных названий объектов и пояснительные подписи (качественные и количественные характеристики и другие пояснения).

При этом для создания одномерной модели достаточно иметь только геометрические характеристики. В случае же 2-D моделирования необходимо иметь более развернутую информацию как для целей более точного моделирования гидродинамических процессов, так и для исчерпывающего анализа всевозможных последствий моделирования (подтопление территории, развитие оползневых явлений, гидродинамические аварии и т. д.).

Цифровые форматы, содержание, оформление ЦТК и контроль качества подробно изложен в нормативно-технических документах [20–28].

7 Требования к составу, структуре, функциональным возможностям модели и результатам моделирования

7.1 Состав гидродинамической модели

Для решения поставленных задач (раздел. 3) могут применяться следующие модельные составляющие:

- гидрологическая модель (применяется опционально при отсутствии исходной и сценарной гидрологической информации о приточности на моделируемом объекте). Предназначена для определения гидрографов приточности к моделируемому объекту.

- гидравлическая одномерная модель. Модель направлена на моделирование прохождения паводковых вод при одномерной реализации расчетной схемы. Модель может учитывать полную морфометрию сечений (русло + поймы) и использоваться самостоятельно для определения гидравлических характеристик потока. Также модель может описывать поток исключительно по русловой части речных и мелиоративных систем и выявлять места и участки переполнения русел и выхода воды на пойму. Впоследствии такая модель может расширяться до комплексной модели. Также используется для описания и подбора режима регулирования ГТС и определения волны разлива при гидродинамических авариях;

- гидравлическая квазидвумерная модель. Является упрощенным инструментом моделирования потоков при взаимодействии «русло-пойма» в одномерной схематизации потока. Модель может быть использована для общих задач пропусков паводков и определения границ затопления, где для полученных карт не требуется достаточной детальности. Модель мо-

жет быть применена для грубых оценок зон затопления или же в случае невозможности получить качественные данные о рельефе поймы – для использования их в описании в двумерной схемой. Квазидвумерная модель может быть построена при наличии топографической съемки по русловой и прибрежной части водотока;

- гидравлическая двумерная модель течения паводковых вод по руслу и пойменной территории. Служит для получения качественных и детальных карт границ наводнения, глубин и скоростей течения в затопленной долине. Модель учитывает локальные особенности рельефа, застроенность и характеристики инфраструктуры на пойме;

- комплексная 1D + 2D модель. Для решения задач пропуска паводков и определения зон затопления является наиболее выгодным вариантом. Ввиду быстроты и простоты описания русловая часть моделируемой системы задается одномерной моделью. Двумерная модель задействуется только в местах и в моменты времени, когда происходит перетекание из русловой части на пойму. Взаимообмен воды в русле (1D) и на пойме (2D) осуществляется посредством гидравлических связей, генерируемых автоматически. Водопрпускные и регулирующие сооружения, имеющиеся на пойменных территориях, могут быть описаны как в одномерной модели, так и в двумерной, но оптимальным вариантом может считаться динамический подход при определении пропускной способности сооружения в одномерной схеме, а формирование уровней воды верхнего и нижнего бьефа происходит в двумерной схеме.

Выбор и применимость каждой из модели определяется исходя из постановки конкретной задачи моделирования, а также наличия и качества исходных данных.

7.2 Функциональные требования к гидродинамическим моделям

7.2.1 Требования к функциональным возможностям модели водосборов

В настоящее время в мировой практике существует несколько гидрологических моделей, но все из них построены для решения задачи трансформации осадков в сток. У этих моделей также схож общий принцип построения: водосборный бассейн описывается общей площадью (при необходимости он разбивается на субводосборы) со своими характеристиками и параметрами, на этот бассейн задаются выпадающие атмосферные

осадки и затем на основании заданных характеристик водосбора осадки пересчитываются в сток. Непосредственные пересчеты осадков в гидрографы могут осуществляться различными формализациями: от простых формул до сложных пространственно-распределенных формулировок. Обычно гидрологические модели разделяют на три типа: эмпирические, концептуальные и распределенные. Эмпирические модели достаточно просты и быстры в построении, но не всегда бывают применимы из-за предусмотренных неизменяемых режимов и отсутствия оценки влияния. Концептуальные модели совмещают в себе эмпирические и физические формулы, имеют возможности оценки влияния и применимы для большинства задач в сфере водных ресурсов. Распределенные модели решают физические уравнения, описывают более сложные процессы гидрологического цикла и требуют более качественного и подробного описания водосборного бассейна (как по площади, так и по глубине). Для создания полноценной модели также потребуется проведение гидрогеологических изысканий. Кроме того, такие модели являются, как правило, достаточно дорогостоящими, поэтому их применение не всегда является экономически оправданным при решении многих задач. Выбор класса модели зависит, прежде всего, от поставленных целей выполняемой работы.

В большинстве задач модель должна обеспечивать возможность проведения анализа режима работы ГТС, в т. ч. в зависимости от режима стока в районе исследования. Модель водосбора может иметь следующие функциональные характеристики в различной вариативности, в зависимости от решаемых задач:

- быть применимой для заблаговременного прогнозного расчета гидрографа половодного притока по высоте снеготаяния, увлажнению бассейна в предшествующий осенний период и метеопрогнозу по ходу температур и возможным осадкам;

- при необходимости может применяться для оперативной корректировки гидрографа на основе уточненных данных от метеослужб за краткосрочные предшествующий и последующий периоды.

- позволять рассчитать гидрограф стока от выпадения дождевых осадков любой повторяемости, продолжительности и интенсивности, а также и при снеготаянии;

- иметь возможность учитывать пространственную и временную неравномерность выпадения атмосферных осадков на моделируемые водосборы.

Вышеописанные функциональные требования в полной мере реализуются в концептуальных моделях. Основные характеристики для такой модели показаны на рисунке 8.

Концептуальная модель формирования стока для получения детальных гидрографов должна учитывать следующие метеорологические условия:

- графики выпадения осадков (интенсивность) и хода температур с различной временной дискретностью;
- определяющие температуры начала снеготаяния;



Рисунок 8 – Основные компоненты концептуальной модели

- высотную поясность и изменение температур по высоте при моделировании стока с горных районов.

Для описания характеристик и параметров водосборов в модели необходимо задавать:

- время добегания поверхностного стока по территории водосбора (трансформации паводочной волны);
- запасы продуктивной влаги в поверхностном и корневом слое;
- внутренние модельные параметры, характеризующие перетекание воды и взаимодействие между поверхностным, почвенным и грунтовыми слоями водосбора;
- сезонные колебания уровня грунтовых вод;

- забор воды из бассейна и учет мелиорации;
- испарение с поверхности и формирование потерь стока.

Для удобства использования и ускорения процесса получения корректных и точных результатов в модели предусмотрена опция автокалибровки внутренних параметров гидрологической модели. Также для применения данных для калибровки (или автокалибровки) реализована функция накопления в базе данных гидрологической (графики хода уровней в различных створах и гидропостах, гидрографы) и метеорологической информации (графики хода температур, слои дождевых и снеговых осадков, снеготопливных запасов и т. д.). В базе данных реализован импорт/экспорт в электронные таблицы для возможности их использования в других приложениях.

Для задач моделирования проходов паводков и половодий и оценки их влияния на состояние мелиоративных ГТС может использоваться гидрологическая модель NAM или аналогичные программы с вышеописанным требуемым функционалом и набором опций.

7.2.2 Требования к функциональным возможностям одномерной модели

Одномерная модель должна позволять осуществлять динамическое моделирование на основе одномерных уравнений неустановившегося движения Сен-Венана в открытых руслах, расчетная схема должна быть реализована методом конечных разностей. Одномерная гидродинамическая модель должна разрабатываться с учетом следующего: в модели должно быть реализовано описание докритических и сверхкритических режимов течения.

Для обеспечения возможности описания различных по конфигурации и структуре водотоков модель должна учитывать топологические особенности: возможность описания расчетной схемы любой сложности, в том числе и возможность задания разветвленных, многорукавных и кольцевых участков.

Для обеспечения максимальной точности описания морфометрических особенностей водотока, их плановое описание рекомендуется выполнять на основе масштабных топографических и аэрокосмических карт (рисунк 9), загруженных в фоновые растровые (в наиболее популярных файловых форматах *.jpeg, *.bmp, *.png, *.tif, *.gif). В качестве географической информационной основы для одномерного моделирования возможно также использование векторных электронных карт (в формате shp).

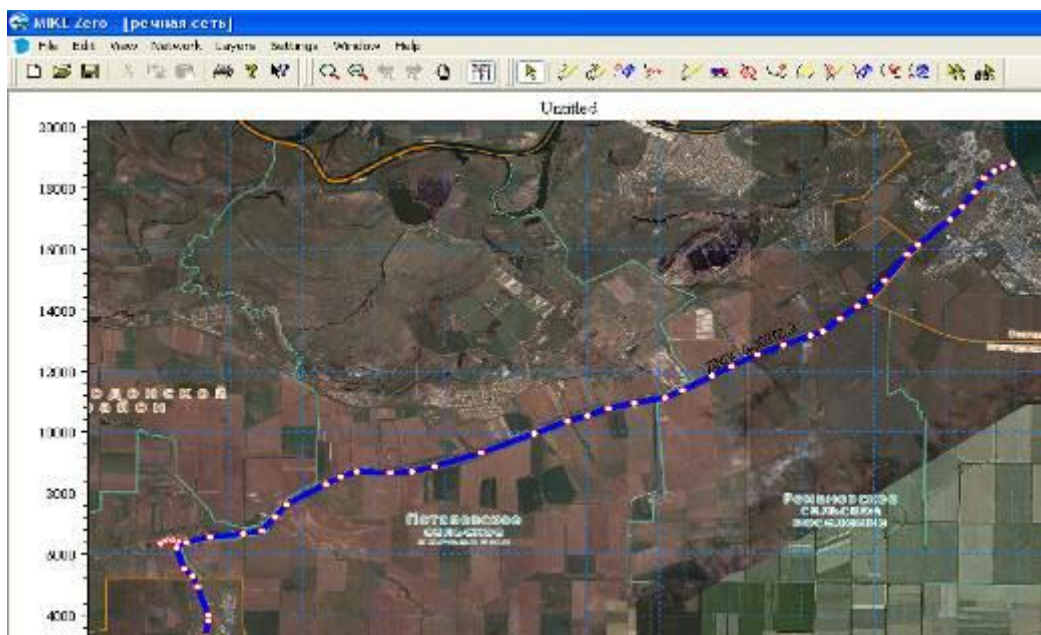


Рисунок 9 – Пример применения аэрокосмической карты в качестве геоинформационной основы для моделирования

Одномерная модель должна учитывать:

- морфометрические особенности, описываемые произвольными по форме и размерам поперечными сечениями;
- наличие гидротехнических сооружений: описание различных регулирующих сооружений, плотин, водосбросов, тоннелей, шлюзов, затворов, мостовых и трубопроводных переходов;
- характеристики гидротехнических сооружений: описание геометрии, коэффициентов потерь напора и пропускной способности переливных и водопропускных сооружений (водосбросных пролетов, кульверт, водосливов). В случае наличия дамб обвалования должна быть предусмотрена опция задания их продольного профиля;
- наличие водохранилищ: описание водохранилищ, прудов или иных аккумулирующих емкостей может осуществляться разными способами в зависимости от наличия исходных данных и поставленных техническим заданием задач. Моделирование водохранилищ (или иных регулирующих емкостей) целесообразно осуществлять при помощи поперечных сечений (стандартный способ, как при описании любого водотока). Описание емкости осуществляется батиграфической характеристикой. В случае, когда, кроме всего прочего, важно получать изменяющуюся вдоль водохранилища кривую свободной поверхности, то водохранилище должно быть описано набором поперечных сечений вдоль по фарватеру. При таком подходе

должно быть обеспечено получение профиля колебаний уровня воды и определение зоны выклинивания. Использование таких методов моделирования следует применять для водных объектов, на которых расположены особо важные сооружения (например, водозаборы) и для проектов, для которых важным является скорость сработки/наполнения емкости. Для водных объектов, где не столь важен продольный профиль свободной поверхности (например, пруды-регуляторы) допустимо описывать емкость единой расчетной точкой с сосредоточенными в ней батиграфическими характеристиками ($W(H)$ или $S(H)$), где W – объем, S – площадь зеркала, H – абсолютная поверхность воды);

- характеристики водохранилищ: описание характеристик водохранилищ и регулирующих резервуаров (ФПУ, НПУ, отметки регулирования);

- правила регулирования водохранилищ: задание графиков сбросов из водохранилища: полезные попуски, сбросы через поверхностные и донные водосбросы, маневрирование затворами. При этом должна быть реализована возможность описания сбросов как в автоматическом режиме по кривой пропускной способности сооружения в зависимости от уровней верхнего и нижнего бьефов, так и в виде графика, задаваемого пользователем как $Q(t)$. Для описания речных и канальных систем с наличием регулирующих сооружений модель должна учитывать режим управления открытием затворов на основе правил регулирования (или позволять подбирать их) и, как правило, выполнять следующие сценарные критерии: не превышения заданного расхода, поступающего в НБ; не превышения УВБ заданной отметки НПУ или не выход уровня воды за пределы допустимого диапазона (ФПУ).

Для обеспечения расчетов таких сценариев модель должна иметь следующие функциональные 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;

- гидрологические особенности: должна быть учтена возможность задания графиков поступления расходов в сосредоточенном в точке и в распределенном по длине водотока виде. Необходимой является также возможность описания постоянных и переменных во времени расходов. В случае переменных графиков важно, чтобы в модели учитывалась временная неравномерность приходящих в моделируемый объект расходов. При

использовании гидрологической модели (пп. 7.2.1) присоединение гидрографов из модели формирования стока в гидравлическую модель должно быть реализовано в автоматическом режиме;

- гидродинамические особенности: должна быть реализована возможность описания шероховатости русла и поймы разными способами. Для упрощенных и первоначальных расчетов может быть использована шероховатость, постоянная по всей моделируемой области. Для уточняющих и калибровочных расчетов необходимо наличие опции описания изменения шероховатости по длине, ширине и глубине моделируемого водотока;

- перегораживающие сооружения: в случае наличия пересекающих русло или проходящих по пойменной территории магистральных авто- и железных дорог, необходимы возможности для учета их пропускной и регулирующей способности: задание их отметок планировки, геометрии и размеров.

7.2.3 Требования к функциональным возможностям двумерной модели

Модель должна позволять осуществлять динамическое моделирование на основе двумерных уравнений неустановившегося движения Сен-Венана, решение методом конечных разностей. Двумерная гидродинамическая модель должна разрабатываться с учетом следующего:

- модель должна формироваться на основе фоновых растровых (в наиболее популярных файловых форматах *.jpeg, *.bmp, *.png, *.tif, *.gif) и векторных электронных карт (в обменном формате shp), реализация географической привязки и стыковка листов растровых карт;

- расчетная сетка должна иметь возможность поворота для подбора оптимального направления осей ячеек;

- модель должна учитывать отметки и особенности рельефа пойменной территории;

- при необходимости модель должна быть разработана с возможностью создания карт начальных условий по наполнению водотоков и пойм;

- модель должна учитывать сужение пойменной территории постройками и протяженными сплошными ограждениями;

- модель должна учитывать пропускную способность перепускных сооружений в русле и на пойме реки, в том числе дамб, насыпей и трубчатых переходов различной конфигурации.

В модели должны быть учтены следующие параметры:

- испарения воды с поверхности;
- плановое изменение значений шероховатости;
- описание граничных условий должно осуществляться графиками $H(t)$, $Q(t)$ и $Q(H)$;
- модель должна иметь возможность моделирования притоков и оттоков (заборов воды), сосредоточенных в конкретных ячейках сетки;
- вихревая вязкость должна задаваться постоянной или переменной с формулировками по скорости или по расходу;
- должны быть предусмотрены инструменты статистической обработки полученных результатов (получение карт максимальных значений отметок, глубин, скоростей в каждой расчетной ячейке);
- модель должна разрабатываться с учетом возможности применения инструментария, экспорта карт и результатов в ГИС посредством обменного формата shp;
- в модели должно быть реализовано назначение различной частоты сохранения результатов расчета.
- модель должна отображать места локализации участков возникновения вероятной гидродинамической аварии, глубины, время и динамику затопления прилегающих территорий вследствие возникновения гидродинамической аварии или прохождения паводка (половодья) (рисунок 10).

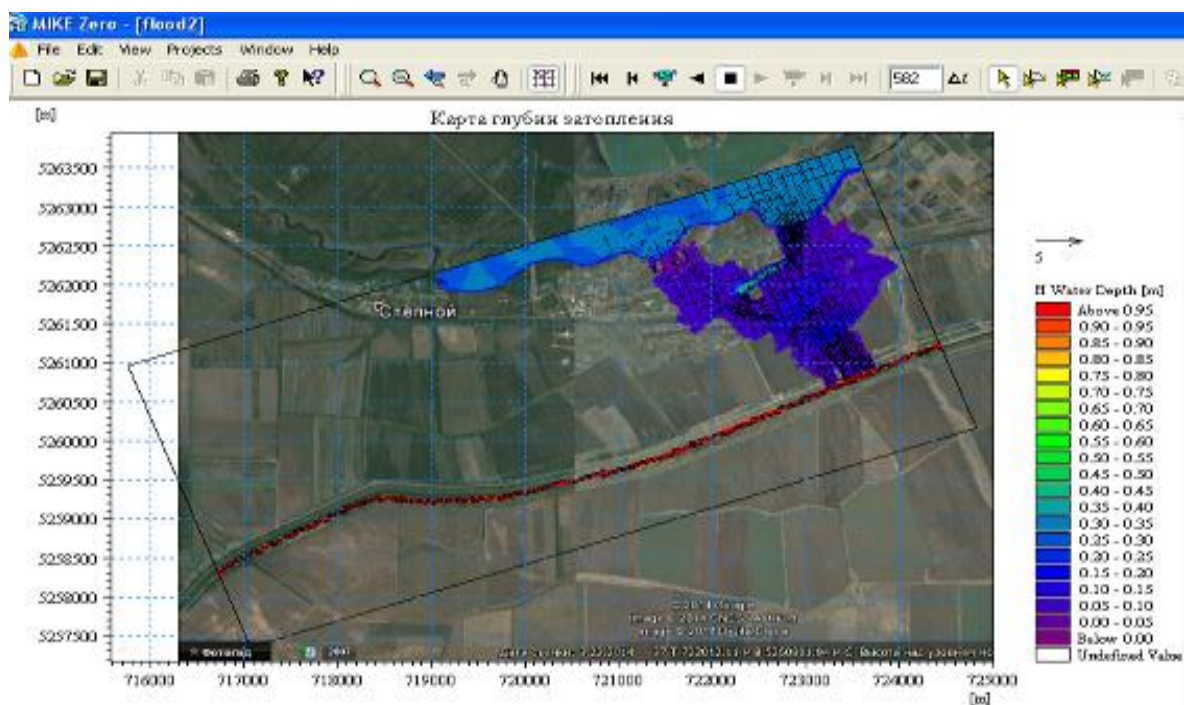


Рисунок 10 – Плановая локализация места возникновения вероятного прорана, границы и глубины затопления приканальной территории, рассчитанные двумерной моделью

7.2.4 Требования к функциональным возможностям комплексной модели

Модель должна позволять осуществлять динамическое моделирование на основе одномерных и двумерных уравнений неустановившегося движения Сен-Венана за счет объединения одномерной и двумерной моделей. Комплексная гидродинамическая модель должна разрабатываться с учетом следующего:

- объединение одномерной и двумерной модели производится посредством гидравлических связей;
- гидравлические связи должны описываться как боковые либо вдольбереговые (перетекание через бровки и прирусловые валы), так и прямые (передача расчетных характеристик потока из одномерной модели в конкретные ячейки расчетной сетки 2D модели);
- в модели должна быть реализована возможность включения (отключения) передачи импульса;
- в боковых связях расчет взаимообмена между русловой и пойменной частью определяется по формуле водослива, при этом геометрия этого водослива (длины, отметки) определяется автоматически. Коэффициенты расхода водослива могут назначаться пользователем;
- прямые связи могут описываться как по расходу, так и по уровню воды;
- прямые связи могут передавать гидравлические характеристики из одномерной модели в двумерную и наоборот;
- в модели должны присутствовать графические пользовательские настройки для отображения гидравлических связей;
- в модели должны быть описаны имеющиеся ГТС любой конфигурации в русле и на пойме;
- связь сооружения (описанного в одномерной модели) с ячейками двумерной модели, количество связанных ячеек определяется шириной описываемого сооружения и должна осуществляться автоматически;
- распределение расхода должно осуществляться в соответствии с локальной глубиной в ячейках;
- следует применять коэффициент сглаживания для погашения локальной численной неустойчивости;
- передача и гидравлическая связь расходов и уровней воды при перетекании вод из русла на пойму и обратно должна осуществляться автоматически;

- в модели должно быть реализовано назначение различной частоты сохранения результатов расчета.

7.3 Операции, выполняемые при разработке гидродинамической модели

В большинстве случаев, при проведении работ по разработке гидродинамической модели ГТС или реки выполняется ряд основных неотъемлемых шагов по описанию схемы моделируемого объекта: описание топологических и морфометрических характеристик; задание гидрологической информации; описание имеющихся на моделируемом объекте ГТС, описание прорываемого сооружения (если требуется), описание шероховатости по руслам и поймам, общая параметризация модели и результатов.

Затем проводятся предварительные адаптационные вычисления для уточнения модели и корректировки возможных недочетов, после чего проводятся калибровочные и верификационные расчеты. После завершения этапа калибровки и проверки адекватности модели, приступают к этапу сценарного моделирования.

7.3.1 Топографическое описание, пространственная дискретизация

На этом шаге должно проводиться задание плановых характеристик сети каналов и (или) рек и разработка плановой топографической основы. Перед началом работ заранее следует определиться с пространственным простираем и обозначить границы модели. В речных или канальных системах с достаточной гидрологической изученностью обычно границы модели назначают в створах имеющихся гидростов. В случаях с малой или недостаточной изученностью, как правило, верхний створ определяют в створе с имеющимися гидрологическими характеристиками (уровни воды или расходы). Для заключительного створа могут понадобиться дополнительные гидрологические изыскания, например, организация временных постов наблюдений или определение гидрологических характеристик аналитическим способом. В случае невозможности проведения таких работ, нижнюю границу тогда следует располагать на максимально возможном удалении от основной зоны исследования, где обычно задают предполагаемый сценарный уровень воды. При этом следует обращать внимание, что этот створ с «фиктивным» уровнем должен быть отнесен от области изучения на такое расстояние, чтобы он не оказывал значимого влияния на гидравлические характеристики потока на исследуемом речном участке. В

этом случае расходно-уровенные характеристики течения в зоне исследования будут формироваться без учета такого «условного» уровня воды.

После определения пространственного простираения требуется выполнить ряд основных действий по формированию модельной схемы. Для этого необходимо:

- подключение фоновых карт для оцифровки трассы моделируемых водотоков;
- непосредственная оцифровка основного водотока и, если необходимо, оцифровка трасс основных притоков. Если гидрографическая сеть есть в электронном виде, то ее импорт;
- при необходимости корректировка пикетажа;
- назначение створов с наличием гидротехнических сооружений.

7.3.2 Описание морфометрических характеристик

При задании морфостворов в модели описываются геометрия, размеры и отметки поперечных сечений, на основании которых определяется пропускная способность сечений. Для полноценного описания любых типов водотоков и сечений пользователем должно быть выполнено:

- назначение створов с сечениями. Идентификация производится по названию водотока и пикетажа;
- задание открытых или замкнутых поперечных сечений. Замкнутые или закрытые сечения требуется, например, для описания тоннелей, подмостовых сечений или трубчатых переходов, причем форма этих сечений должна иметь возможность описываться как стандартными геометрическими формами, так и произвольными;
- ввод непосредственной информации о сечении. В зависимости от типа имеющейся информации у пользователя, в программе должен быть реализован ручной или автоматический ввод (импорт) табличных данных для построения сечений (x , z , где x – расстояние от постоянного начала, z – отметка) из внешних источников;
- по полученным описаниям сечения « x - z » должно выполняться автоматическое получение гидравлических характеристик, непосредственно используемых для решения уравнений Сен-Венана. Данные должны быть автоматически сгенерированы в табличном виде (ширина, площадь живого сечения, гидравлический радиус, расходная характеристика);
- проверка расходных характеристик сечения. Кривая должна быть гладкой и монотонно возрастающей. В сечениях с резким изменением ши-

рины, на отметках выхода на пойму, могут возникать скачкообразные уменьшения значений расхода. В этом случае требуется корректировка, которая производится посредством поправочного коэффициента на шероховатость;

- при необходимости учащения расчетных точек (например, для получения более гладкой кривой свободной поверхности) должна быть использована опция линейной интерполяции сечений (по длине, ширине и отметкам) с добавлением расчетных створов с заданным шагом по длине и с добавлением промежуточных интерполированных поперечных сечений в конкретном пикете;

- задание переменной шероховатости по глубине сечения;
- проверка расходной характеристики сечения.

7.3.3 Задание гидрологической информации

При задании гидрологической информации должно быть выполнено:

- сформирована база временных рядов гидрологических данных;
- назначение точек (пикетажа) приточности;
- задание типов приточности: точечных и распределенных по длине водотока притоков;
- задание точечных заборов воды и распределенных по длине оттоков, если таковые имеются, в виде потерь воды на испарение, разгрузку в грунтовые воды и т. д.;
- описание временных типов 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;
- учет возможности заиливания сечения водопропускного сооружения;
- интерполяция пропущенных данных.

7.3.4 Описание гидротехнических сооружений

При задании гидротехнической информации 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, руслах и на поймах);
- 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 комплексных сооружений (сооружений разных типов, сосредоточенных в одном створе).

7.3.5 Описание прорываемого сооружения

При описании прорываемого сооружения должно быть выполнено:

- описание прорыва плотины и боковых сооружений (насыпей, дамб);
- для некоторых расчетных сценариев (разрушение секции плотины или при заданной степени разрушения сооружения) размер прорана может задаваться пользовательски (во времени изменяются отметки дна, ширина прорана по дну и заложение откосов);
- описание поверхностного и (или) донных размывов грунтовых плотин (размер прорана определяется в ходе вычислений);
- расчет развития прорана при размыве грунтовой плотины осуществляется на уравнении выноса материала (транспорта наносов);
- возможность учета обрушения верхней части плотины при донном размыве;
- при необходимости, моделирование прорыва каскада водохранилищ.

Определение волны разлива должно рассчитываться при различных сценариях:

- избыточная приточность к водохранилищам (резервуарам) во время

половодья или дождевого паводка;

- недостаточная пропускная способность водопропускных сооружений гидроузла;
- размыв тела плотины;
- перелив через гребень плотины.

7.3.6 Описание гидродинамических параметров

При описании гидродинамических параметров должно быть выполнено:

- описание шероховатости. В зависимости от моделируемого объекта, шероховатость может меняться вдоль по длине моделируемого участка и по высоте (шероховатость на глубине меженного уровня, шероховатость в русловой части до бровок и шероховатость на поймах). Если шероховатости на левой и правой пойме сильно отличаются, то может быть использована опция разделения на три зоны шероховатости по ширине: левая пойма, русло и правая пойма;

- описание фильтрационных процессов. Фильтрационные процессы задаются в модели исходя из данных натуральных инженерно-геологических изысканий. Основным показателем, характеризующим фильтрацию, является коэффициент фильтрации K_f ;

- задание в водотоках начальных условий по расходам и уровням или глубинам (заполнениям), либо принятие заполнений моделируемых систем из готовых файлов результатов предварительных сценарных расчетов на конкретный момент времени (так называемая опция горячего старта). Использование начальных условий, заданных любым из способов, снижают возмущения вычислительного характера;

- задание фиксированного или плавающего (адаптивного) шага расчета;

- в зависимости от типа моделируемого объекта использование различных аппроксимаций волны: динамическая и полная динамическая высшего порядка, диффузионная, кинематическая волна.

7.3.7 Увеличение стабильности одномерной модели.

Общие рекомендации

В гидродинамическом моделировании в качестве критерия стабильности используется критерий Куранта (в зарубежной литературе также на-

зывается критерием Куранта-Фридриха-Леви). Этот критерий зависит от подобранной временной и пространственной дискретизации модели:

$$Cr = \frac{V + \sqrt{gh} \Delta t}{\Delta x}, \quad (1)$$

где V – скорость, м/с;

h – глубина, м;

Δt – шаг расчета по времени, с;

Δx – пространственный шаг, минимальное расстояние между поперечными сечениями, м.

В случае аварийного завершения работы модели (нарушение критерия устойчивости) или возникновения паразитных возмущений для повышения стабильности расчетной схемы и вычислений рекомендуется:

- уменьшить шаг расчета Δt ;
- увеличить пространственный шаг. Следует размещать поперечные сечения на таком расстоянии друг от друга, чтобы достаточно описывались морфометрические изменения водотока. Не следует размещать поперечные сечения слишком близко. В случае вычислительных ошибок, следует либо разнести сечения на большее расстояние, либо уменьшить временной шаг;
- для гашения возмущений можно увеличить шероховатость (локально, в местах возмущений);
- выбрать аппроксимацию волны по типу «полная динамическая высшего порядка»;
- если имеются боковые присоединения к реке или каналу, то необходимо, чтобы отметки дна у основного русла и притока совпадали. В случае несовпадения, требуется корректировка. В случаях, когда в реальности имеют место разногласия в донных отметках, рекомендуется в поперечник с более высокими отметками дна вносить условный «слот». В таком подходе слот представляет из себя узкую щель в дне поперечника, при этом самая низкая отметка этого слота должна быть равна отметке дна стыковочного поперечного сечения. Важно следить, чтобы геометрические размеры слота были таковы, чтобы не оказывали влияния на объемы воды, проходящие через этот поперечник. Иными словами, слот должен быть таким узким, чтобы объем воды, уходящий на его заполнение, не был сколько-нибудь значительным.

7.3.8 Увеличение стабильности двумерной модели.

Общие рекомендации

Для повышения устойчивости расчетной схемы и стабильности вычислений в случае нарушения расчета рекомендуется выдерживать значения критерия Куранта. В общем случае, этот критерий должен быть меньше единицы. Для очень гладкой батиметрии критерий может принимать значение до 10. Для поддержания стабильного расчета может потребоваться:

- уменьшить шаг расчета Δt ;
- в местах возмущений увеличить шероховатость;
- для снижения возмущений увеличить значение вихревой вязкости;
- сгладить батиметрию таким образом, чтобы в сетке не было резких скачкообразных изменений отметок, также следует избегать ситуаций с резким изменением отметок дна. Все повороты русел также должны быть плавными (для этого, возможно, потребуется уменьшить размер ячеек сетки, что приведет к уменьшению временного шага);

- в расчетной сетке все «узкие места» как протоки, затоны, мелиоративные или ирригационные каналы, должны быть описаны не менее пятью ячейками по ширине (для корректного воспроизведения взаимодействия расходов и уровней). Не создавайте в расчетной сетке ситуаций, когда основной поток (или течение в канале) направлен под углом 45° по отношению к ячейкам. Расчетная сетка, по крайней мере, должна быть ориентирована таким образом, чтобы основные векторы течения были перпендикулярны самой границе;

- использовать файл начальных условий;
- увеличить пространственный шаг. Для этого необходимо сгенерировать расчетную сетку заново с большим размером ячеек.

7.3.9 Увеличение стабильности комплексной модели.

Общие рекомендации

Перед началом работы с комплексными моделями важно удостовериться в правильности и стабильности работы отдельных 1D и 2D моделей. Наиболее часто встречающиеся ошибки при составлении комплексных моделей связаны с некорректным описанием связей. В общем подходе после добавления каждой новой связи рекомендуется запускать тестовый расчет. При таком подходе источник ошибки вычлнить гораздо проще и быстрее.

Общие рекомендации при задании гидравлических связей:

- при описании боковых связей увеличьте коэффициент сглаживания;
- обеспечьте разрыв связи в местах приходящих притоков (если они описаны как речной участок);
- при формировании стандартной связи используйте опцию распределения расходов в соответствии с глубинами.

7.4 Описание полной структуры гидродинамической модели

Полная гидродинамическая модель может иметь четырехуровневую структуру.

Первая ступень – гидрологическая модель формирования стока па- водковых вод с водосборных бассейнов.

Модель должна получать результаты в виде гидрографов с каждого частного водосборного бассейна и рассчитывать сток от выпадения дожде- вых осадков и от снеготаяния. Также она должна учитывать площади, конфигурацию, особенности субводосборов (городских и природных), по- тери воды на испарение и фильтрацию поверхностных вод в грунтовые во- ды. Модель должна обрабатывать прогнозные или сценарные метеоро- логические характеристики, учитывать неравномерность выпадения осадков по пространству и изменение режима снеготаяния при изменении высот- ной поясности. Модель должна иметь удобный инструментарий для авто- калибровки модельных параметров водосборного бассейна (подбор коэф- фициентов взаимодействия между поверхностным, почвенным и грунто- вым стоком). Полученные в результате расчета гидрографы должны в ав- томатическом режиме передаваться на следующую ступень в одномерную (или квазидвумерную) модель речной системы как граничные условия по притоку. Модель должна быть способна к быстрому изменению метеоро- логических параметров и получению скорректированных гидрографов в оперативном режиме.

Вторая ступень – одномерная или квазидвумерная гидравлическая модель.

Модель должна описывать речные и каналные системы любой сложности: с русловой и пойменными частями, наличием гидротехниче- ских сооружений различной компоновки и классов, различными варианта- ми описания шероховатостей в зависимости от наличия исходных данных и структуры моделируемого объекта. В программе не должно быть преду- смотрено ограничений на описание схематики или морфометрии. Про-

грамма должна быть ориентирована и на научные исследования и на прикладные практические задачи. Должна иметь понятный и удобный графический интерфейс и встроенную защиту от грубых ошибок, предусмотренный инструментарий для ручного ввода данных и для импорта информации из внешних источников.

Должна быть реализована встроенная база стандартных гидротехнических сооружений, на основе которой возможно описать ГТС любой компоновки и сложности. К их числу относятся: водосливы, кульверты, мосты, насосы, сооружение с графиком работы $Q(t)$, прорываемое сооружение, сооружение, описываемое набором кривых при разных значениях уровней воды в верхнем и нижнем бьефе. Также должна быть реализована возможность задавать правила регулирования и подбирать оптимальные режимы работы сооружений в автоматическом режиме. Каждое из перечисленных сооружений должно иметь опции задания коэффициентов потерь напора. В случае нестандартного сооружения, которое невозможно задать комбинацией формализованных элементов, должна быть предусмотрена возможность описания сооружения пользователем (пользовательские надстройки).

В случае решения задач, требующих построения детальных карт затопления, строится одномерная модель только русловой части рек и каналов с последующим созданием двумерной модели поймы и их гидравлическим объединением (четвертая ступень). В случае решения задач при достаточности одномерного описания объекта, модель может использоваться самостоятельно. Модель должна учитывать современные морфометрические характеристики: отметки бровок русел и дамб, а также пропускную способность перегораживающих и регулирующих сооружений. Модель должна учитывать верховую и боковую приточность, возможный забор воды из системы различными водопотребителями и водоразбор на мелиоративные нужды, учитывать трансформацию и аккумуляцию вод имеющимися емкостями (пруды-аккумуляторы, запруды, водохранилища). Одномерная модель в обязательном порядке должна учитывать работу всех имеющихся в русле гидротехнических сооружений при различных режимах регулирования. Также на этой модели проводится выбор оптимального режима маневрирования затворами и иными водопропускными сооружениями. В случае если получаемый расчетный уровень свободной поверхности в нижнем бьефе превышает критические отметки (превышение отметок бровок или гребня защитных дамб), то необходимо проведение последующих расчетов по определению зон затопления, выполняемых на двумерной модели. Если при расчетном паводке и выбранном режиме ра-

боты ГТС перелива воды на пойму не наблюдается, то составление двумерной модели не является обязательным для данного сценария.

В случае создания квазидвумерной модели, структура модели является такой же, как и в случае с одномерной русловой моделью. Принципиальным отличием является лишь добавление в речную сеть пойменных участков, описываемых как отдельные водотоки со своей длиной, геометрией и отметками, поперечными сечениями с простиранием на соответствующие ширины левой и правой поймы. Перетекание вод из руслового участка на пойменный (и обратно, если позволяют отметки) осуществляется посредством специальных каналов-связей, имитирующих собой участок бровки или прируслового вала, через который происходит перелив. Канал-связка должен учитывать ширину переливного фронта, отметки, уклоны и шероховатость.

Третья ступень – двумерная модель русловой и пойменной части рек и каналов.

Описывается двумерной картой-сеткой, охватывающей всю потенциально затопляемую территорию, включая русловые части рек и каналов. Может использоваться как самостоятельная модель для решения паводковых задач и моделирования распространения волн прорыва, так и как часть комплексной модели. Модель строится отдельно и самостоятельно, если имеются качественные данные не только по пойменной части, но и по русловой, например, проведены детальные промеры русла эхолотом или имеются современные лоцманские карты. Также модель может быть рекомендована к независимому использованию, если на моделируемой области не имеются сооружения со сложной компоновкой и сложными правилами управления. В противном случае рекомендуется использовать комплексную модель.

Четвертая ступень – комплексная 1D и 2D модель.

Русловая часть создается в одномерной схеме, пойменные территории описываются в двумерной схеме. Такой подход подразумевает объединение преимуществ одномерной и двумерной моделей без их функциональных ограничений и сложностей, а именно:

- одномерная модель не требует значительных временных затрат на создание модели и проведение вычислений, точно описывает течение в руслах и работу ГТС, но не учитывает двумерных эффектов при выходе на пойму;

- двумерная модель качественно описывает растекание паводковых вод на пойме, но имеет сложности с описанием пропускной способности

сооружений. Также для качественного двумерного описания русловой части и ее пропускной способности требуется расчетная сетка с более мелким пространственным шагом, что увеличивает физическое машинное время вычислений.

Комплексная модель должна использоваться для решения задач пропуска паводковых вод, регулирования сооружениями и получения карт затоплений территории при выходе воды за пределы русла и при переливе через дамбы обвалования. Модель должна учитывать отметки естественного рельефа и различных перегораживающих сооружений (автодорожные и железнодорожные насыпи, непроницаемые ограждения). Расходы и места поступлений паводковых вод на пойму, должны передаваться в двумерную модель из одномерной модели в автоматическом режиме. В ходе расчета должны быть определены: общая граница затопленной территории, глубины и абсолютные отметки уровня воды, а также скорости и направления течения. Также при пост-обработке результатов расчета необходимо получать список инфраструктурных объектов, попавших в область затопления.

7.5 Калибровка и верификация моделей

Важным и неотъемлемым этапом при создании модели является ее калибровка. 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 и никогда не измеряются во время паводков непрерывно, а зафиксированные изменения уровня во времени обычно надежны во многих створах вдоль водотока.

Перед началом калибровочных расчетов необходимо провести анализ существующих постов на исследуемом участке и данных наблюдений с них. Из имеющихся данных следует выбрать один-два характерных паводковых события. Заранее требуется исключить из рассмотрения возможные некорректные данные, например, смыкание бьефов, паразитные (заведомо ошибочные) значения, выявленные необоснованные противоиклоны.

При отсутствии стационарных гидропостов и данных наблюдений рекомендуется организация временных постов мониторинга с фиксацией уровней воды и параллельным измерением атмосферных осадков, а также

температур и снегозапасов, если рассматривается зимний период. Период мониторинга должен охватывать либо весь период снеготаяния, либо два-три дождевых события, если наблюдения ведутся в теплый сезон. 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.

При моделировании гидродинамической аварии для калибровки к рассмотрению принимаются исторические паводки с наивысшими расходами сбросов в нижний бьеф.

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

После проведения калибровки должна быть осуществлена верификация модели. Рекомендуется проводить верификацию по двум-трем паводковым событиям разных годов наблюдения.

Если после всех попыток откалибровать модель, она не может удовлетворительно воспроизвести наблюдаемые паводки, 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. При прохождении паводка производить измерения сложнее, следовательно, больше возможность получения ошибки, чем при низкой воде. Также важно удостовериться, что все данные приведены к одной уровенной плоскости сравнения (единый датум);

- морфометрические характеристики реки заданы с недостаточной частотой по длине реки, 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;

- неверно описаны стратегии управления водохранилищами и иными регулирующими емкостями, неверно задана работа водосбросов и других сооружений;

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

- при прохождении паводков возможно полное или частичное блокирование русел мусором, растительностью и т. д. Этот участок реки начинает работать в подпоре. При моделировании это трудно учесть, так как случаи блокировки практически не фиксируются и достоверно не известно ни время образования этого блока, ни размеры.

Не учтена информация, касающаяся фильтрации воды:

- поглощение воды сухим грунтом затопляемых зон или испарение заполнения боковых мертвых объемов паводковыми водами;

- сезонное изменение шероховатости в результате влияния растительности.

При использовании в калибровке исторических данных важно принимать во внимание возможную изменчивость характеристик, как водосборных бассейнов, так и самой речной сети в сравнении данных за предыдущие года с современным состоянием. При выборе данных для калибровки следует учитывать следующее:

- изменение условий землепользования, что влечет за собой изменение графиков стока с водосборов;

- застройка и зарастание русел;

- появление новых сооружений, как в русле, так и на пойме (мосты, насыпи, дамбы, иные ГТС);

- изменение характеристик ГТС после сбора данных.

Перед корректировкой настроек и параметров модели, с целью получения правдоподобных результатов и во избежание грубых ошибок, перед началом калибровочных расчетов рекомендуется выполнить ряд операций:

- проверить правильность параметров водного баланса: сток с водосборов, расход притоков, который не был явно учтен в модели, наличие промышленных водовыпусков или водозаборов, водосбросов плотин, начальные условия в поймах, наличие приливно-отливных явлений;

- проверить корректность заданных в модели объемов водохранилищ и резервуаров, учтена ли дополнительная аккумуляция в притоках и в водосборных бассейнах, не заданных в модель явно, имеются ли поймы и второстепенные русла, протоки, староречья, меандры.

Общие рекомендации по корректировке модельных параметров можно разделить на четыре раздела:

- при сдвигах времени прихода пика паводка (половодья) требуется проверка правильности заданных длин участков, шероховатость русла и поймы, гидравлические характеристики водотока;

- при несовпадениях в абсолютных значениях пиков паводков (половодий) следует уточнить шероховатость поймы, аккумуляцию воды в модельной системе, наличие основных притоков, корректность описания гидротехнических сооружений;

- при различиях в форме полученных гидрографов может потребоваться задание изменения шероховатости по глубине поперечных сечений, проверить общую схематизацию модели и уточнить гидрологические характеристики;

- при расхождениях в объемах гидрографов необходимо проверить аккумуляцию воды на поймах, шероховатость пойменных участков и гидрологические характеристики.

При выполнении калибровки можно руководствоваться общими правилами и принимать во внимание, что каждый случай и модель – уникальны, результат калибровки зависит, в том числе, и от бюджета проекта и поставленных временных рамок. Кроме этого нужно учесть качество исходных данных и требуемую точность результатов.

7.6 Требования к результатам моделирования

7.6.1 Гидрологическая модель

В результатах должны быть получены гидрографы общего, поверхностного, почвенного и грунтового стока с каждого отдельного водосборного бассейна. Результаты должны иметь возможность быть представленными в виде графиков с опцией графического сравнения с данными измерений.

7.6.2 Гидравлическая одномерная модель

Основные требования к результатам моделирования:

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

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

- 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, а также места выхода воды на пойму;

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

- должна быть предусмотрена опция построения квазидвумерных карт затопления территории с рассчитанными уровнями воды, глубинами, скоростями течения, а также карты потенциальной опасности как произведения величин глубины и скорости потока;

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

При расчете гидродинамической аварии должны быть получены следующие характеристики:

- гидрограф излива во времени;

- график опорожнения верхнего бьефа;

- график хода уровня в нижнем бьефе;

- время добегания волны до каждого из интересующих створов вдоль по моделируемому водотоку;

- при расчете размыва грунтовой плотины требуется получение изменяемых во времени параметров прорана: изменение ширины прорана по дну и по верху, отметки дна, заложений откосов прорана. Также должны быть получены расходы потока через проран, скорость течения в проране, ширина потока в проране.

7.6.3 Гидравлическая двумерная модель

Основные требования к результатам моделирования:

- визуализация процесса распространения паводочной волны или волны излива в виде двумерных карт, графиков от времени;

- двумерные карты глубин, отметок и скоростей течения (а также компонент расхода и скоростей) с возможностью нанесения векторов направлений течений, а также с возможностью подключения фоновых, расстровых и векторных карт и возможностью импорта данных в ГИС (формат *.shp) для последующей обработки;

- получение карт направлений течений;

- получение результатов в виде графиков в характерных точках;

- построение продольных профилей по заданной трассе с нанесением результатов расчета.

7.6.4 Сценарные исследования для оценки влияния гидродинамических процессов на безопасность и техническое состояние мелиоративных гидротехнических сооружений

Разработанная гидродинамическая модель гидротехнического ГТС или реки после подтверждения адекватности (путем проведения калибровки и верификации) и соответствия реальным условиям и характеристикам объекта моделирования должна быть исследована с применением сценарного подхода.

Основной задачей сценарных исследований является анализ возможных рисков возникновения и развития гидродинамических аварий на основе изучения гидрологических характеристик при различных возможных исходных гидродинамических условиях.

В каждом конкретном случае условия сценарных исследований могут быть различными (в зависимости от типа и технических особенностей объекта моделирования, гидрометеорологических условий, задач, решаемых в ходе моделирования) и должны быть разработаны специалистами в области гидрологии и гидротехники. Требования к сценарным исследованиям должны быть включены в техническом задании на разработку гидродинамической модели.

Сценарии исследований должны базироваться на наиболее вероятных, научно-обоснованных зависимостях и значения различных параметров модели. Условием сценария может быть задание одного или нескольких временных рядов $Q(t)$, $H(t)$, $Q(H)$ в граничных условиях модели с целью оценки динамики изменения уровней, значений расходов, времени добегания расходов в расчетных створах рек или каналов.

Например, граничные условия модели в голове участка реки могут быть заданы одним или несколькими гидрографами редкой повторяемости, что позволит оценить динамику изменения отметок уровней и оценить вероятность перелива через дамбу обвалования. При этом может оцениваться время возникновения перелива через гребень дамбы с момента начала поступления в русло реки в расчетном створе расходов редкой повторяемости.

Модель ГТС может быть исследована с применением условия аварии на водосбросном или регулирующем сооружении. При этом задаются различные вероятные условия снижения пропускной способности или верти-

кальные и плановые изменения поверхностных отметок ГТС. По результатам моделирования оценивается изменения вертикальных отметок уровней воды с учетом приточности, значения которых сопоставляются с отметками дамб ГТС. Это позволяет оценить вероятность возникновения перелива, возникновения прорана и динамику распространения волны прорыва. Рассчитываются также временные интервалы изменения уровней и расходов в расчетных створах.

При решении задач одномерного или двумерного моделирования постановка задачи сценарных исследований будет отличаться.

В общем случае одномерное моделирование позволяет оценить вероятность превышения уровней воды в руслах каналов и рек над отметками дамб и берегов и локализовать на плане места и масштабы возможных линейных участков перетекания воды.

Двумерное моделирование позволяет оценить возможные последствия распространения волны прорыва в плане. Оценить время добегания, скорость распространения волны, а также границы, глубину и продолжительность затопления прилегающих территорий.

Сценарные исследования гидродинамических моделей могут выполняться для различных целей и исходных условий. Некоторые возможные цели и условия сценарных исследований гидродинамической модели приводятся в таблице 2.

Таблица 2 – Возможные цели и условия сценарных исследований гидродинамической модели

Цель сценарного исследования	Условия сценарного исследования модели
Оценка воздействия расходов редкой повторяемости на ГТС	Описание граничных условий модели гидрографами редкой повторяемости
Оценка воздействия гидродинамических аварий водопропускных ГТС, сопровождающиеся снижением пропускной способности	Описание граничных условий гидрографами, моделирующими снижение пропускной способности ГТС при различных условиях приточности в верхнем бьефе сооружения
Оценка риска перелива через водоподпорное ГТС	Описание граничных условий модели верхнего бьефа ГТС гидрографами редкой повторяемости. Описание планово-высотного развития возможного прорана в теле дамбы или плотины
Оценка параметров и динамики планового распространения волны прорыва и затопления пойменных территорий рек	Описание нижнего бьефа и (или) поймы реки двумерной моделью. Описание граничных условий модели гидрографами редкой повторяемости

При комплексном исследовании, включающем в себя элементы речного бассейна и ГТС, сценарные исследования целесообразно проводить для различных значений вероятности превышения стока ($P_{\%} = 50$, $P_{\%} = 20$, $P_{\%} = 10$; $P_{\%} = 5$; $P_{\%} = 2$; $P_{\%} = 1$, а также $P_{\%} = 0,5$).

8 Порядок организации работ по моделированию гидродинамических процессов и требования к их результатам

Работы по моделированию гидродинамических процессов целесообразно проводить на стадии проведения предпроектных обследований мелиоративных объектов в целях определения проблемных сооружений и объемов работ.

Рекомендуется проведение работ в следующем порядке и составе:

- рекогносцировочные обследования ГТС и водосборных бассейнов;
- разработка технического задания на проведение работ по моделированию гидродинамических процессов с целью обоснования видов и объемов противопаводковых мероприятий;
- разработка технических заданий и программ инженерных изысканий для получения исходных данных для компьютерного моделирования;
- проведение полевых и камеральных инженерно-изыскательских работ, подготовка технических отчетов;
- проведение работ по разработке компьютерной модели и ее сценарных исследований;
- разработка технического отчета по результатам компьютерного моделирования.

В результате проведения комплекса работ по моделированию гидродинамических процессов должен быть разработан технический отчет, в котором должны быть представлены:

- цели и задачи моделирования;
- исходные данные для моделирования;
- обоснование и описание типа и структуры компьютерной модели исследуемого ГТС;
- описание калибровки и верификации разработанной модели;
- описание сценариев и результаты сценарных исследований разработанной модели, аналитические материалы (графики, диаграммы, таблицы данных, профиля ГТС);
- выводы и предложения производству.

Результаты работ должны быть представлены как в печатном, так и электронном виде. На электронном носителе должен быть представлен технический отчет и работающая компьютерная модель исследуемого ГТС или водного объекта.

В выводах и предложения производству должны быть сформулированы основные результаты моделирования, которые объективно обосновывают виды и объемы работ, которые необходимо выполнить с целью обеспечения безаварийного пропуска весенних половодий (паводков) через мелиоративные сооружения. Должны быть на плане локализованы участки ГТС, на которых имеется вероятность перелива через гребни плотин и дамб. Должны быть определены сооружения, фактическая пропускная способность которых не соответствует требуемым значениям.

Должны быть подготовлены обоснования объемов текущих и капитальных ремонтных работ, направленных на обеспечение безопасного пропуска весенних половодий (паводков).

Работы по гидродинамическому моделированию и обоснованию составов и объемов противопаводковых работ могут проводиться как мелиоративными эксплуатационными организациями (при наличии квалифицированных кадров, необходимого программного и аппаратного обеспечения и допусков к видам работ по инженерным изысканиям и проектированию), так и подрядными научными и проектными организациями, имеющими необходимое обеспечение и квалификацию.

Заключение

В настоящее время возрастает потребность в решении многочисленных задач, связанных с повышением эффективности оперативного и прогнозного управления водными ресурсами, что обуславливает необходимость применения средств компьютерного цифрового моделирования гидродинамических процессов. Применение таких компьютерных систем позволит создать эффективные системы учета, проектирования, эксплуатации и модернизации мелиоративных систем, что, в свою очередь, позволит обеспечить эффективное рациональное использование водных ресурсов в мелиоративном комплексе и обеспечить безопасность ГТС и территорий, потенциально подверженных затоплениям.

Использование средств компьютерного цифрового моделирования на стадии предпроектных проработок, а также на стадии проектирования позволит повысить обоснованность и объективность принимаемых проектных решений, что, в свою очередь, приведет к повышению уровня безопасности ГТС и снижению затрат бюджета на проектные и строительные работы

Настоящие методические указания могут использоваться при разработке компьютерных цифровых моделей гидродинамических процессов с целью объективного обоснования видов, состава и объема неотложных инженерно-технических и организационных мероприятий по пропуску весеннего половодья и паводков через гидротехнические сооружения подведомственные Депмелиорации Минсельхоза России.

Список использованных источников

1 Об утверждении Перечня видов работ по инженерным изысканиям, по подготовке проектной документации, по строительству, реконструкции, капитальному ремонту объектов капитального строительства, которые оказывают влияние на безопасность объектов капитального строительства: приказ М-ва регионального развития РФ от 30 декабря 2009 г. № 624: по состоянию на 14 ноября 2011 г. // Гарант Эксперт 2014 [Электронный ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

2 О геодезии и картографии: Федеральный закон от 26.12.1995 № 209-ФЗ: по состоянию на 4 марта 2013 г. // Гарант Эксперт 2014 [Электронный ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

3 Об обеспечении единства измерений: Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ: по состоянию на 23 июня 2014 г. // Гарант Эксперт 2014 [Электронный ресурс]. – НПП «Гарант-Сервис», 2014.

4 Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ (в ред. от 21.07.2014) // Собрание законодательства РФ. – № 1 (часть 1). – 2005. – ст. 16.

5 Инженерно-геодезические изыскания для строительства: СП 11-104-97: утв. Госстроем России 14.10.97 № 9-4/116: введ. в действие с 01.01.98. – М., 1998. – 92 с.

6 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96: СП 47.13330.2012: утв. приказом Федерального агентства по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству (Госстрой России) от 10.12.12 № 83/ГС: введ. в действие с 01.07.13. – М., 2012 – 117 с.

7 ВСН 33-2.1.07-87 Инженерно-геодезические изыскания для мелиоративного и водохозяйственного строительства. – Взамен ВСН 33-2.1.01-83; введ. 1987-06-01. – М.: Союзводпроект, 1987. – 32 с.

8 Пособие по производству геодезических работ в строительстве (к СНиП 3.01.03-84): утв. приказом ЦНИИОМТП 10.07.85 № 147: введ. в действие с 10.07.85. – М.: Стройиздат, 1985. – 157 с.

9 Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. Геодезические, картографические инструкции нормы и правила: ГКИНП (ГНТА)-03-010-03: утв. руководителем Федеральной службы геодезии и картографии России 25.12.03 № 181-пр.: введ. в действие с 01.02.04. – М.: Роскартография, 2004. – 168 с.

10 Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500: ГКИНП 02-033-82: утв. ГУГК 05.10.79: введ. в действие с 01.01.83 с поправками, утвержденными ГУГК 09.09.82 приказ № 436 п. – М.: Недра, 1980. – 85 с.

11 Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства: СП 11-103-97: утв. приказом Департамента развития научно-технической политики и проектно-изыскательских работ Госстроя России 10.07.97 № 9-1-1/69: введ. в действие с 15.08.97. – М., 1997. – 32 с.

12 ГОСТ Р 52572-2006 Географические информационные системы. Координатная основа. Общие требования. – Введ. 2007-01-01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 11 с.

13 ГОСТ Р 52573-2006 Географическая информация. Метаданные. – Введ. 2007-01-01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 53 с.

14 ГОСТ Р 53611-2009 Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических и землеустроительных работ. Общие технические требования. – Введ. 2011-01-01. – М.: Стандартинформ, 2012. – 7 с.

15 ГОСТ Р 55535-2013 Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Общие технические требования к системам геодезического мониторинга. – Введ. 2014-01-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 11 с.

16 ГОСТ Р 55536-2013 Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Общие требования к фундаментальным геодезическим параметрам. – Введ. 2014-01-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 7 с.

17 Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. Геодезические, картографические инструкции нормы и правила: ГКИНП (ОНТА) 02-262-02: утв. приказом руководителя Федеральной службы геодезии и картографии России 18.01.02 № 3-пр.: введ. в действие с 01.03.02. – М.: Роскартография, 2002. – 23 с.

18 Инструкция по контролю и приемке топографо-геодезических работ, выполняемых при мелиоративных изысканиях: нормативно-технич. документ. – М.: Гипроводхоз, РИО, 1972 г.

19 Инструкция о порядке контроля и приемки геодезических, топографических и картографических работ: ГКИНП (ГНТА)-17-004-99: утв. приказом руководителя Роскартографии 29.06.99 № 86-пр.: введ. в действие с 01.01.00. – М.: Роскартография, 1999. – 69 с.

20 ГОСТ Р 52440-2005 Модели местности цифровые. Общие требования. – Введ. 2006-07-01. – М.: Стандартиформ, 2006. – 7 с.

21 ГОСТ Р 51605-2000 Карты цифровые топографические. Общие требования. – Введ. 2001-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 5 с.

22 ГОСТ Р 51608-2000 Карты цифровые топографические. Требования к качеству. – Введ. 2001-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 9 с.

23 ГОСТ Р 50828-95 Геоинформационное картографирование. Пространственные данные, цифровые и электронные карты. Общие требования. – Введ. 1996-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 15 с.

24 Карты цифровые. Методы оценки качества данных. Общие требования: ОСТ 68-3.4.2-03: утв. приказом Роскартографии 31.03.03 № 58-пр.: введ. в действие с 01.06.03. – М.: Роскартография, 2003. – 28 с.

25 Карты цифровые топографические. Формы представления. Общие требования: ОСТ 68-3.6-99: утв. приказом Роскартографии 12.07.99 № 92-пр.: введ. в действие с 01.10.99. – М.: Роскартография, 1999. – 7 с.

26 Карты цифровые топографические. Общие требования: ОСТ 68-3.1-98: утв. приказом Роскартографии 29.04.98 № 66 п.: введ. в действие с 01.11.98. – М.: Роскартография, 1998. – 20 с.

27 Карты цифровые топографические. Требования к качеству цифровых топографических карт: ОСТ 68-3.4-98: утв. приказом Роскартографии 29.04.98 № 66 п.: введ. в действие с 01.11.98. – М.: ЦНИИГАиК, 2000. – 33 с.

28 Карты цифровые топографические. Правила цифрового описания картографической информации. Общие требования: ОСТ 68-3.3-98: утв. приказом Роскартографии 29.04.98 № 66 п.: введ. в действие с 01.11.98. – М.: ЦНИИГАиК, 2000. – 22 с.