

О. Е. Приходченко. — Ростов-на Дону : Феникс, 2003. — 315 с.

2. **Argal, E.** Ecological Assessment of Water Filtration Processes and Application of Injection Solutions in Antifiltration and Reinforcement Measures in the Dam Base

[Text] / E. Argal, V. Ashikhmen, V. Korolyov, L. Pronina // ICOLD 72<sup>nd</sup> Annual Meeting : Proceedings (Symposium on Environmental Considerations for Sustainable Dam Projects). — May 16–22. — Seoul, 2004. — P. 17–34.

УДК 502/504:627.13: 556.16

**А. В. Магомедова**, доктор техн. наук, профессор

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Дагестанский государственный технический университет»

**Е. С. Дмитриев**, канд. физ.-мат. наук

ОАО «Институт прикладной экологии»

**М. А. Гуруев**, канд. биол. наук

Северо-Кавказское отделение ОАО «Институт прикладной экологии», Махачкала

## РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПАВОДКОВОГО ПОТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ (НА ПРИМЕРЕ УСТЬЕВОГО УЧАСТКА РЕКИ ТЕРЕК)

*В статье дается описание компьютерной реализации гидродинамической модели паводкового руслового потока, которая представляет собой прогнозно-моделирующий программный комплекс на базе ГИС-интерфейса и внешних расчетных модулей. Программный комплекс обеспечивает расчет и визуализацию кривых свободной поверхности руслового потока, уровней воды в створах и точек перелива воды через гребни дамб обвалования, а также определение пропускной способности русла и потерь стока по его длине при паводковых расходах различной обеспеченности. Эти данные являются основой для моделирования зон затопления прибрежных территорий.*

*In the article the description of computer realization of hydrodynamic model of the flood channel flow is given, which is a prognosis-simulating software system on the basis of GIS-interface and external calculated modules. The software system provides calculation and visualization of free surface curves of the channel flow, water-levels in river stations and points of water overflow through crests of ridging dams, and also definition of channel capacity and losses of the water flow on its length at flood water discharge of different provision. These data are a basis for simulation of flood zones of coastal territories. Key words: hydrodynamic model, flood, channel flow, channel capacity, software system, GIS- technologies.*

В результате воздействия природных и антропогенных факторов все чаще возникает угроза возникновения чрезвычайных экологических ситуаций. Проблема прогноза и предупреждения их особенно актуальна для области экологии и охраны водных и земельных ресурсов — основы жизнеобеспечения людей. Возрастающая антропогенная нагрузка на поверхностные и подземные источники природных вод приводит к ухудшению их качества не

только в зоне сброса загрязняющих веществ, но и на значительном расстоянии от нее вследствие переноса загрязняющих веществ водными артериями. Паводки на реках усиливают эти процессы в результате наводнений, вызывающих затопление населенных пунктов и сельскохозяйственных угодий, ирригационных систем, берегозащитных и других сооружений. Эта проблема актуальна и для Дагестана, территория которого изрезана сетью больших

и малых рек и ирригационных каналов и экономике которого периодически повторяющиеся наводнения приносят огромный ущерб, в частности в прибрежной зоне нижнего течения реки Терек в связи с неурегулированностью его стока, сложной конфигурацией деформируемого русла и требующей постоянного обновления системой дамб обвалования. С целью ее разрешения необходимы инструменты для оперативного анализа и обработки большого объема гидро- и геоинформации, а также для моделирования гидрологических и гидравлических процессов в русле реки и речной долине.

Разрешение проблемы оперативно-го прогноза негативных последствий паводков возможно на основе численного и пространственного моделирования гидрологических и гидравлических процессов в русле реки и в речной долине с использованием компьютерных и геоинформационных технологий. Работа над созданием компьютерной гидродинамической модели естественного руслового потока ведется в Дагестанском государственном техническом университете с 90-х годов прошлого столетия, а в последние годы — совместно с Институтом прикладной экологии (Москва). Необходимость создания такой модели связана как с задачами прогноза подъема уровней воды в реке и границ зон затопления в период паводков, так и с задачами прогноза переформирования речных русел под влиянием паводков и гидротехнических сооружений. Сложность задачи заключается в том, что естественные речные русла имеют форму, изменяющуюся по длине реки, что вызывает колебания гидравлических характеристик потока как по ширине реки в конкретном створе, так и по длине реки от створа к створу; причем эти характеристики непрерывно изменяются с течением времени вследствие глубинного и планового переформирования русла нестационарным русловым потоком, расходы которого меняются в десятки раз от межени к паводку.

Вследствие многофункционального характера решаемых задач численного моделирования и пространственного характера обрабатываемой информации компьютерная реализация гидродинамической модели паводкового руслового потока применительно к устьевому участку реки Терек представляет собой прогнозно-моделирующий программный комплекс TerekFloodGIS на базе ГИС-интерфейса и внешних расчетных модулей для численного моделирования гидродинамических и гидрологических процессов в русле реки при паводках различной обеспеченности [1]. Составными частями программного комплекса являются следующие:

- геоинформационная среда для работы с электронными картами и атрибутивными базами данных, для проведения пространственного ГИС-анализа и обеспечения обмена информацией ГИС с внешними расчетными модулями, для визуализации результатов моделирования;

- крупномасштабная векторная электронная карта прибрежных территорий нижнего течения реки Терек;

- топографическая база данных по поперечным профилям исследуемого участка реки Терек;

- гидравлические модули Streamflow и SedimentTransport для численного моделирования гидравлических процессов в речном русле и транспорта руслоформирующих наносов при паводках различной обеспеченности [1, 2];

- гидрологические модули Water\_Frequency и Terek\_Water для статистической обработки гидрологических рядов, расчета и визуализации кривых обеспеченности расходов воды [3];

- программное обеспечение для встраивания расчетных модулей в ГИС и взаимного обмена данными между ГИС и внешними модулями.

Геоинформационная среда для функционирования прогнозно-моделирующего комплекса, созданная на базе ГИС-оболочки ArcView GIS 3.2, содержит векторную электронную карту прибрежных территорий нижнего течения

реки Терек с топографической основой масштаба 1:200 000 и стандартным набором тематических слоев.

Для численного моделирования гидравлических процессов в реке и визуализации результатов расчета из среды ГИС, по данным проектных институтов «Севкавгипроводхоз» (1965–1987), «Даггипроводхоз» (1994) и Государственного океанографического института (2006), были созданы дополнительные тематические слои «Поперечники 1965–1994 гг.» и «Поперечники 2006 г.», содержащие информацию соответственно по 70 и 40 поперечным профилям русла. Созданные в среде Microsoft Excel электронные базы содержат табличную и графическую информацию о высотных отметках, линейных поперечных координатах поперечных профилей русла и отметках уровней воды в межень. Средствами Microsoft Excel и ArcView GIS 3.2a электронные таблицы конвертируются в dBASE формат и текстовые файлы, информация с которых в качестве входных данных используется гидравлическими модулями Streamflow и SedimentTransport. Визуализация из среды ArcView GIS поперечных профилей русла и доступ к табличным данным Microsoft Excel осуществляется инструментом «Горячая связь», имеющим соответствующее программное обеспечение на алгоритмическом языке Avenue.

Созданная геоинформационная среда обеспечивает работу как с основными модулями, так и с внешними моделирующими и расчетными модулями, вызываемыми непосредственно из среды ArcView GIS с помощью встроенных в интерфейс кнопок с соответствующим программным обеспечением.

Расчетные гидравлические модули Streamflow, Sediment Transport и гидрологический модуль Water\_Frequency разработаны на алгоритмическом языке Compaq Visual Fortran 6.6, снабженном визуализатором массивов Compaq Array Visualizer 1.6 и интегрированной средой разработки, отладки и выполнения программ Developer Studio [1–3].

Гидравлический модуль Streamflow предназначен для численного моделирования гидродинамических процессов в речных руслах сложной конфигурации, расчета кривых свободной поверхности руслового потока на пике паводков различной обеспеченности, определения урезов воды, точек перелива воды через гребни дамб и их геодезических координат для визуализации на электронной карте, расчета пропускной способности створов реки и исследуемого участка реки в целом. При создании этого модуля были исследованы различные математические модели течения с точки зрения возможности их применения для исследуемого устьевое участка реки Терек протяженностью 105 км от Каргалинского гидроузла до Каспийского моря со сложной поперечной, продольной и плановой конфигурацией паводкового русла.

Для расчета неустановившегося руслового потока реализована математическая модель течения в виде общей интегральной формы уравнений неустановившегося одномерного течения, основанной на гипотезах Сен-Венана и законах сохранения массы и количества движения, применимой как для неразрывных, так и разрывных течений в руслах с произвольной, изменяющейся вдоль реки формой поперечного сечения [1].

Дискретизацию интегральных уравнений для численного моделирования осуществляли на основе консервативных конечно-разностных схем, что позволило использовать метод сквозного счета на фиксированной сетке без выделения разрывов, обеспечивающий возможность пошагового расчета гидравлических процессов в естественных руслах неправильной формы. В отличие от существующих одномерных моделей, применимых для призматических русел, реализован алгоритм расчета распределения гидравлических характеристик течения по ширине русел произвольной формы, включая островную и многорукавную, учтены силы давления в поперечных сечениях и реакции боковых поверхностей русла.

Для расчета кривых свободной поверхности потока при максимальных паводковых расходах было использовано интегральное уравнение установившегося одномерного течения

$$\begin{aligned} & (P/\rho + Q^2/\omega)_{x_2} - (P/\rho + Q^2/\omega)_{x_1} - \\ & - (R_s/\rho)_{x_{\text{ф}2}} - g \int_{x_1}^{x_2} \omega (i_o - i_f) dx = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

полученное из системы уравнений неустановившегося течения, и соответствующая ему конечно-разностная схема следующего вида:

$$\begin{aligned} & (P/\rho + Q^2/\omega)_{m+1} - (P/\rho + Q^2/\omega)_m - \\ & - (R_s/\rho)_m - g\omega(i_o - i_f)_{m+1/2} \Delta x_m = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $Q(x)$  — расход потока, м<sup>3</sup>/с;  $\omega(x)$  — площадь живого сечения, м<sup>2</sup>;  $P(x)$  — силы давления, приложенные к поперечным границам расчетного отсека потока, Н;  $R_s(x)$  — равнодействующая реакций боковых поверхностей отсека, Н;  $i_o$  — продольный уклон дна реки;  $i_f = Q|Q|/K^2$  — уклон трения;  $K(x)$  — модуль расхода, м<sup>3</sup>/с;  $\rho$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\Delta x$  — продольный интервал, м;  $m$  — номер створа.

Численная модель расчета установившегося течения в речных руслах на основе уравнения (2) реализована в гидравлическом модуле Streamflow, который состоит из головной программы, управляющей алгоритмом расчета, и более 20 подпрограмм, размещенных в текстовых файлах на алгоритмическом языке Compaq Visual Fortran 6.6 с расширением .f90, обеспечивающих различные расчетные процедуры, файловый ввод и вывод данных, в том числе:

**DataType\_Declaration** — модуль объявления атрибутов переменных и динамически размещаемых массивов, используемых различными подпрограммами;

**Streamflow\_Inp** — подпрограмма ввода исходных данных из текстовых файлов с разделителями;

**Streamflow\_Out** — подпрограмма вывода результатов расчета в текстовые файлы с разделителями для возможности конвертирования их в базы данных ГИС и визуализации;

**SteadyFlow** — подпрограмма расчета кривых свободной поверхности потока и гидравлических характеристик

в естественном речном русле, обеспечивающая решение конечно-разностного уравнения установившегося течения;

**CrossSection** — подпрограмма расчета гидравлических характеристик живых сечений речного русла неправильной формы при заданных уровнях воды в створе, а также расчета распределения гидравлических характеристик течения по ширине русла;

**SectDirect, GeodInfo** — подпрограммы обработки исходной информации геодезической съемки русла для представления ее в требуемой форме входных данных;

**WaterEdge** — подпрограмма расчета геодезических координат урезов воды в створах реки для визуализации их на электронной карте;

**DamOverfull** — подпрограмма определения створов реки с точками перелива воды через гребни дамб и расчета их геодезических координат для визуализации на карте;

**RiverCapacity** — подпрограмма расчета пропускной способности речного русла в пределах дамб обвалования;

**WaterSurface** — подпрограмма формирования файлов для визуализации в среде Microsoft Excel и Compaq ArrayVisualizer расчетных кривых свободной поверхности потока без учета потерь стока по длине русла;

**WaterSurfRiv** — подпрограмма формирования файлов визуализации кривых свободной поверхности потока с учетом потерь стока по длине исследуемого участка реки.

Входные данные, вносимые в соответствующие текстовые файлы: набор признаков счета, определяющих различные сценарии моделирования; граничные условия; число расчетных створов и расстояния между ними; координаты поперечных профилей русла; плановые координаты промерных точек; отметки съемочных урезов воды в межень и др.

Апробация гидравлического модуля Streamflow выполнена на материалах натурных данных Даггидромет-

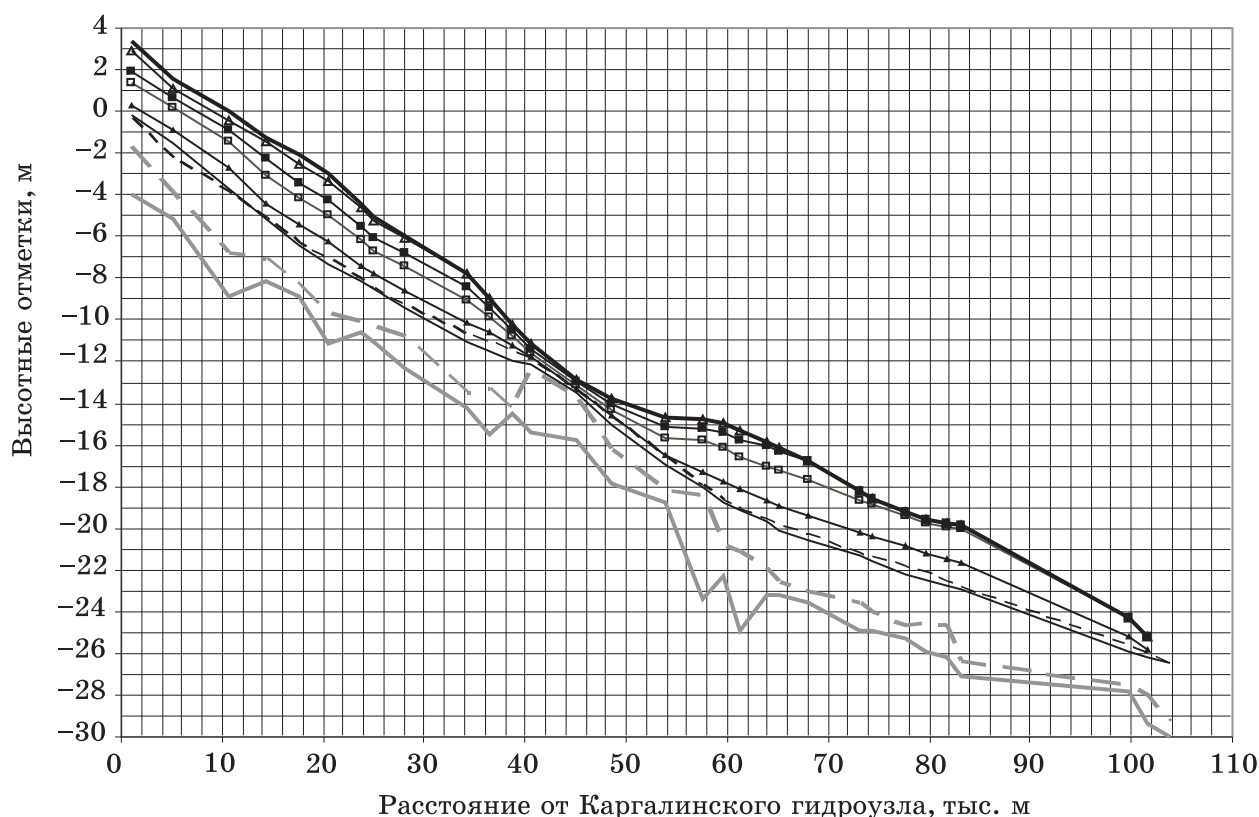
центра и Западно-Каспийского БВУ о пике паводка 2002 г. и данных Государственного океанографического института о меженных уровнях воды 2006 г. в 40 створах на устьевом участке реки Терек. Результаты сопоставления расчетных и натуральных кривых свободной поверхности потока в обоих случаях показали удовлетворительное соответствие.

С помощью модуля Streamflow проведены следующие численные эксперименты: определение пропускной способности створов реки, пропускной способности исследуемого участка реки и потерь стока по длине русла при расходах различной обеспеченности; расчет высотных отметок кривых свободной поверхности потока на исследуемом участке реки Терек при паводковых расходах обеспеченностью от 75 до 0,5 %, без учета и с учетом потерь стока по длине русла из-за возможного перелива воды через гребни дамб обвалования;

поиск створов реки с переливом воды через гребни дамб и расчет геодезических координат точек перелива для визуализации их на электронной карте.

Результаты расчетов автоматически выводятся в текстовые файлы кривых свободной поверхности потока, поперечных профилей русла, геодезических координат точек перелива воды через гребни дамб и др. После загрузки в таблицы Microsoft Excel, визуализатор массивов Compaq Array Visualizer или в базы данных ArcView GIS результаты расчетов могут визуализироваться на экране компьютера из среды ГИС.

По результатам расчетов в системе ArcView GIS созданы дополнительные тематические слои «Уровни воды в створах 0,5...75 % обеспеченности» и «Перелив воды через гребни дамб ...» (при расходах 0,5...75 % обеспеченности). Уровни воды в створах при расходах различной обеспеченности визу-



**Расчетные профили водной поверхности устьевых участков реки Терек на пике паводка при расходах 75...0,5 % обеспеченности и уровне Каспия -27,03 м (с учетом пропускной способности русла):**  $Zd_{min}$  — нижнее дно;  $Zd_{m0}$  — среднее дно при межennem расходе;  $Z_0$  — измененные уровни 09.2006;  $Z$  — расчетные уровни  $Q = 220 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $Z_{75\%}$  — расчетные уровни  $Q_{75\%} = 350 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $Z_{50\%}$  — расчетные уровни  $Q_{50\%} = 690 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $Z_{20\%}$  — расчетные уровни  $Q_{20\%} = 960 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $Z_3\%$  — расчетные уровни  $Q_{3\%} = 600 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $Z_{0,5\%}$  — расчетные уровни  $Q_{0,5\%} = 2000 \text{ м}^3/\text{с}$

ализируются инструментом «Горячая связь». Геодезические координаты точек перелива воды через гребни дамб при расходах различной обеспеченности визуализируются на электронной карте на линиях поперечников при включении и активизации тем «Перелив воды через гребни дамб ...» с соответствующим процентом обеспеченности расхода воды.

Диаграммы Microsoft Excel с информацией о кривых свободной поверхности потока в нижнем течении реки Терек при паводковых расходах различной обеспеченности и при различных сценариях моделирования, а также с информацией о пропускной способности отдельных створов и всего исследуемого участка реки в пределах дамб обвалования (с учетом потерь стока по длине русла) открываются кнопками со специальным программным обеспечением, встроенными в интерфейс ArcView GIS. Одна из таких диаграмм показана на рисунке.

Компьютерная гидродинамическая модель нижнего течения реки Терек во время паводков и полученная в результате численных экспериментов информация о пропускной способности русла, уровнях подъема воды и местах перелива воды через гребни дамб в различных створах реки при прогнозируемых расходах паводка являются

основой для моделирования зон затопления прибрежных территорий при паводках различной обеспеченности.

**Ключевые слова:** гидродинамическая модель, паводок, русловой поток, пропускная способность русла, программный комплекс, ГИС-технологии.

#### Список литературы

1. **Магомедова, А. В.** Численное и пространственное моделирование гидравлических процессов в русле реки и речной долине во время паводка [Текст] / А. В. Магомедова, Р. Р. Таинов, М. А. Гуруев // Вестник ДГТУ. Технич. науки. — Вып. 7. — Махачкала, 2005. — С. 170–173.
2. **Магомедова, А. В.** Разработка компьютерной модели транспорта руслоформирующих наносов в открытых руслах [Текст] / А. В. Магомедова, М. А. Гуруев, Н. В. Семенова // Паводковые потоки и водные бассейны: проблемы регулирования водотоков, безопасность и надежность ГТС, мониторинг водных объектов и защита водоохранных зон : сб. статей. — Нальчик — Махачкала, 2007. — С. 105–109.
3. **Магомедова, А. В.** Разработка внешних гидрологических модулей ArcView GIS для статистической обработки гидрологических рядов наблюдений и визуализации кривых обеспеченности расходов воды и наносов [Текст] / А. В. Магомедова, М. А. Гуруев, Е. Н. Сепиханова, Е. Ш. Абдусаламов // Вестник ДГТУ. Технич. науки. — Вып. 7. — Махачкала, 2005. — С. 165–169.