Российское акционерное общество
энергетики и электрификации
«ЕЭС России»

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЗОНЫ ЗАТОПЛЕНИЯ И ОЦЕНКИ ВЫНОСА ЗОЛОШЛАКОВОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ АВАРИИ НА ЗОЛООТВАЛАХ ТЭС

СО 34.21.547 - 2005

Санкт-Петербург
2006

gost.e-ecolog.ru

Российское акционерное общество
энергетики и электрификации
«ЕЭС России»

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЗОНЫ ЗАТОПЛЕНИЯ И ОЦЕНКИ ВЫНОСА ЗОЛОШЛАКОВОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ АВАРИИ НА ЗОЛООТВАЛАХ ТЭС

СО 34.21.547 - 2005

Санкт-Петербург
2006

Разработана Открытым акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им.Б.Е.Веденеева»

Исполнители: доктор физ.-мат. наук *В.И.КЛИМОВИЧ*
канд. техн. наук *В.А.ПРОКОФЬЕВ*

Согласовано с Департаментом ТЭК Минтопэнерго России 24.12.2004 г.

Директор департамента ТЭК *А.Б.ЯНОВСКИЙ*

Утверждено Бизнес единица «Гидрогенерация» РАО «ЕЭС России» 02.02.2005 г.

Заместитель Управляющего директора *Р.М.ХАЗИАХМЕТОВ.*

Срок первой проверки – 2009 г.
Периодичность проверки – один раз в 5 лет.

Ключевые слова: гидродинамическая авария, волна прорыва, зона затопления, золошлакоотвал, золошлаковый материал, одномерная нестационарная модель, коэффициент Шези, коэффициент шероховатости, гидравлический радиус, концентрация взвешенных частиц, гидравлическая крупность, транспортирующая способность, проран, численный алгоритм, верификация методики расчета, программный комплекс, инструкция пользователя, база данных.

© ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2006

УДК 626/627

Методика расчета зоны затопления и оценки выноса золошлакового материала при гидродинамической аварии на золоотвалах ТЭС	СО 34. 21. 547 – 2005 Вводится впервые

Дата введения – 2006 – 04 – 01

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Настоящая Методика предназначена для расчетов параметров волны прорыва при оценке последствий гидродинамической аварии на золошлакоотвалах (ЗШО). Полученные в результате расчетов характеристики прорывного потока и зоны затопления используются при составлении декларации безопасности ЗШО для оценки ущерба, возможного вследствие аварии ГТС.

1.2. В настоящее время в связи с развитием численных методов и компьютерной техники в мировой практике расчетов характеристик волны прорыва, как правило, используются методы, основанные на численном решении уравнений гидродинамики [1].

1.3. Данная методика основана на одномерном нестационарном описании потока и переносимой им субстанции (частиц золы). Наряду с одномерными существуют и двумерные (плановые) методики расчета параметров волны прорыва. Двумерные модели позволяют получить более подробную информацию о характеристиках прорывного потока, однако эти модели требуют значительно больших ресурсов компютера, и их реализация связана со значительно большими затратами машинного времени. Эти обстоятельства в ряде случаев делают нереальным использование двумерных плановых моделей (при распространении волны прорыва на большие расстояния порядка сотен и тысяч километров). Для отдельных участков распространения волны прорыва использование плановых моделей является вполне оправданным. Подробный обзор существующих методик и программ приведен в [1].

Издание официальное

Настоящий СО не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен без разрешения организации-разработчика

1.4. Разработанный алгоритм решения системы дифференциальных уравнений, описывающей гидродинамику потока (уравнения Сен-Венана) и транспорт золошлаковых материалов (ЗШМ), позволяет рассчитывать растекание потока при любой топографии прилегающей местности (как по сухому руслу, так и по реке).

1.5. Для расчета динамики развития прорана (в связи со сложностью математического описания этого процесса), как правило, используют приближенные подходы, основанные на обобщении натурных данных или результатов экспериментов

1.6. Разработанная методика верифицирована на многих тестовых примерах, для которых имеются либо аналитические решения, либо экспериментальные данные. Произведено также сопоставление численных результатов с натурными данными по зоне затопления для конкретного ЗШО.

1.7. Данная методика может использоваться также для расчетов последствий гидродинамической аварии на плотинах и каскадах ГЭС.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ВОЛНЫ ПРОРЫВА И ТРАНСПОРТА ЗШМ

Расчет параметров волны прорыва в рамках одномерной модели выполняется на основе системы нестационарных уравнений мелкой воды, которая может быть представлена в виде [2,3]

$$\frac{\partial (Q)}{\partial t}+\frac{\partial (Q^2/\Omega)}{\partial s}=-g\Omega\frac{\partial H}{\partial s}+\frac{g}{C^2R\Omega}Q|Q|+\frac{\partial}{\partial s}\left(\nu^T\Omega\frac{\partial V}{\partial s}\right), \qquad (1)$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t}+\frac{\partial (Q)}{\partial s}=F\ , \qquad (2)$$

где t – время; s – координата вдоль направления течения; Q – расход воды; $\Omega=\Omega(H)$ – площадь живого сечения потока; H – отметка свободной поверхности воды; $C = R^{1/6}n^{-1}$ – коэффициент Шези, определяемый по формуле Маннинга; n – коэффициент шероховатости; $R = \Omega/\chi$ – гидравлический радиус; χ – смоченный периметр живого сечения; g –

ускорение свободного падения; ν^T – коэффициент турбулентной вязкости; F – удельный приток воды на единицу длины русла (боковая приточность).

Коэффициент вязкости ν^T для течений с большими числами Рейнольдса в основном определяется турбулентной вязкостью жидкости в данной точке и может быть определен на основе формулы Прандтля

$$\nu^T = æ L u_*,$$

где $u_* = \frac{|Q|}{C\Omega}\sqrt{g}$ – динамическая скорость, $æ = 0{,}4$ – постоянная Кармана; L – масштаб турбулентности.

В качестве масштаба турбулентности можно принять, например, среднюю по сечению глубину потока или 0,25 – 0,4 глубины (окончательный выбор масштаба турбулентности может быть сделан в результате калибровки модели).

Вынос золошлакового материала из ЗШО и распределение его на окружающей местности моделируется на основе уравнения переноса с учетом осаждения частиц ЗШМ и неравномерного профиля его концентрации по глубине. Уравнение, описывающее транспорт взвешенных частиц в предположении малости концентрации и в пренебрежении эффектом диффузии по координате s, имеет вид [4,5]

$$\frac{\partial (c\Omega)}{\partial t} + \frac{\partial (cQ)}{\partial s} = I_c, \qquad I_c = P_c w(c_m \psi - cB), \tag{3}$$

где c – осредненная по сечению концентрация ЗШМ (средняя мутность); w – гидравлическая крупность частиц ЗШМ; c_m – концентрация взвешенных частиц, соответствующая транспортирующей способности потока; B – ширина русла для отметки H; P_c – коэффициент связи придонной концентрации частиц ЗШМ со средней по сечению концентрацией.

Гидравлическая крупность частиц материала определяется их средним диаметром d и плотностью ρ_s, а также плотностью ρ_w и кинематической вязкостью воды ν [6]. Предельная концентрация частиц материала рассчитывается в зависимости от формы их движения (влекомые или взвешенные наносы) с помощью одной из известных формул И.И. Леви, В.С. Кнороза, А.В. Караушева, В.Н. Гончарова (в программный комплекс, описанный ниже, включены несколько формул) [6].

Связанное с эрозией или выпадением частиц ЗШМ изменение геометрии части поперечного сечения, находящейся ниже отметки свободной поверхности воды, определяется соотношениями:

$$\frac{dz}{dt}=\frac{P_c}{1-m}w(c-c^{\text{макс}}\cos\theta)\ ;\quad \frac{dy}{dt}=\frac{P_c}{1-m}wc^{\text{макс}}\sin\theta\,, \tag{4}$$

где θ – угол между внешней нормалью к сечению в данной точке и осью z; z, y – координаты точки сечения (рис.1); m – пористость ЗШМ.

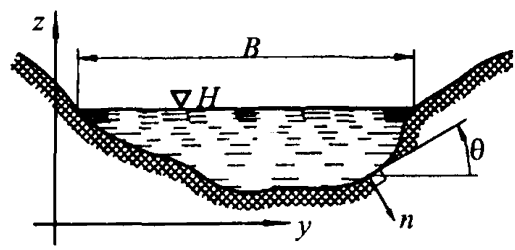


Рис.1. Поперечное сечение потока

Изменение площади живого сечения $d\theta$ при фиксированной отметке свободной поверхности воды H за время dt в результате процессов размыва и осаждения частиц ЗШМ определяется на основании (7) соотношением

$$d\Omega=\frac{P_c}{1-m}dt\left[\int_{z_{\text{дн}}}^{H}wc_{\text{макс}}\sin\theta dz-\int_{y_л}^{y_п}w(c-c_{\text{макс}}\cos\theta)dy\right]=$$

$$=\frac{P_c}{1-m}w(c_{\text{макс}}\psi-cB)dt,$$

где $B=y_п-y_л$; $z_{\text{дн}}$ – отметка дна.

Последнее выражение представляет собой источниковый член, находящийся в правой части уравнения (3).

Коэффициент P_c для взвешенных наносов согласно рекомендациям [7] может быть вычислен, например, по формуле

$$P_c=\frac{6w}{\kappa u_*}\left(1-\exp\left(-\frac{6w}{\kappa u_*}\right)\right)^{-1}. \tag{5}$$

В случае, когда скорость потока становится меньше срывающей скорости для ЗШМ U_0 ($U_0=\sqrt{2}\,V_н$, $V_н$ – неразмывающая скорость [6]) или

при отсутствии слоя ЗШМ на дне правая часть уравнения (3) имеет вид $T_0 = -P_c \omega c B$, т. е. происходит только процесс осаждения ЗШМ.

Граничные условия для уравнений (1) – (3) задаются следующим образом. В начале рассматриваемого участка трассы движения волны прорыва ($s = s_{мин}$) задается расход $Q(s_{мин}, t) = f_Q(t)$ и концентрация размываемого грунта $c(0,t) = f_c(t)$. В конце рассматриваемого участка трассы движения ($s = s_{макс}$) задается кривая связи $H(s_{макс}, t) = H(Q)$. Начальные условия для уравнений (1) – (3) ставятся в виде $Q(s,0) = Q_0(s)$; $H(s,0) = H_0(s)$; $c(s,0) = c_0(s)$. При этом в каждой расчетной точке трассы движения задается первоначальная геометрия сечения русла $y_л(s,z,0) = y_{л0}(s,z)$; $y_п(s,z,0) = y_{п0}(s,z)$.

Применительно к ЗШО, поскольку начало трассы выбирается от участка дамбы напротив прорана, $f_Q(t) = 0$; $f_c(t)$ задается на основе имеющихся данных о концентрации ЗШМ в ЗШО (в случае отсутствия таких данных можно полагать $f_c(t) = 0$).

В данной методике предусмотрена также возможность задания на выходе из прорана концентрации ЗШМ, соответствующей транспортирующей способности потока. При этом расчет концентрации ЗШМ производится только на прилегающей к ЗШО местности.

В данной методике транспорт грунта тела ограждающих сооружений не учитывается, так как предполагается, что объем выноса ЗШМ значительно превышает объем грунта из образовавшегося прорана.

3. ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ПРОРАНА

Развитие гидродинамической аварии на ЗШО связано с прорывом напорного фронта в дамбах обвалования ЗШО. Проран в теле ограждающей ЗШО дамбы образуется, как правило, не мгновенно, а развивается во времени в зависимости от конструкции дамбы и причин, приведших к аварии. Динамика развития прорана оказывает в свою очередь влияние на характеристики волны прорыва.

В настоящее время существует ряд подходов для учета динамики развития прорана в грунтовой плотине. Одним из них является использование расчетных схем, построенных на моделировании транспорта частиц грунта потоком [3]. Такой подход весьма перспективен, так как в нем учитываются характеристики грунта (размеры его частиц, связность и т.д.), геометрические размеры конкретной плотины, гидродинамика потока. Его применение усложняется, во-первых, необходимостью адаптации и верификации применительно к бурным потокам с высокой концентрацией частиц. Во-вторых, существенную роль на развитие про-

рана в грунтовой плотине оказывает процесс обрушения (оползания) его откосов. Количественная оценка этого процесса требует рассмотрения дополнительных гипотез.

Другой подход предусматривает применение эмпирических формул определения размеров прорана и скорости его развития, полученных в результате обобщения натурных данных и результатов экспериментов. Примеры использования такого подхода приведены в работах [1] и [8]. В частности, согласно [1], формулы для итоговой (максимальной) ширины прорана B (м) и для условного времени его развития T (ч) имеют вид:

$$B = 0{,}66k_0\left(V_w H_w\right)^{0.25}; \qquad T = 0{,}071V_w^{0.47}H_w^{-0.9}, \tag{6}$$

где V_w – объем излива, м^3; H_w – начальное превышение отметки верхнего бьефа над конечным положением дна прорана, м. Коэффициент $k_0 = 0{,}7$ при развитии прорана, обусловленном фильтрацией через тело плотины, и $k_0 = 1{,}0$ – при образовании прорана за счет перелива через гребень плотины (дамбы).

В предположении, что проран за время аварии будет размыт до основания дамбы ЗШО (или при задании конечной отметки дна прорана) и что изменение ширины прорана во времени происходит по линейной зависимости, соотношения (6) характеризуют закон изменения ширины прорана во времени. Данный подход реализован в настоящей Методике. Для оценки максимально возможных последствий от гидродинамической аварии можно также задавать условие мгновенного образования прорана, ширина которого определяется соотношением (6) или натурными данными по авариям на аналогичных гидротехнических сооружениях.

4. ЧИСЛЕННЫЙ АЛГОРИТМ

Решение уравнений (1) – (3) в общем случае возможно только на основе применения численных методов. В данной Методике алгоритм численного решения задачи строился следующим образом [3]. Для дискретизации по пространственной координате s вводилась разнесенная неравномерная сетка узлов. Использование неравномерной сетки позволяет более подробно описать отдельные участки трассы течения без существенного увеличения общего количества расчетных точек (например, для описания размыва ограждающей дамбы ЗШО). Запись дискретных аналогов уравнений (1) – (3) производилась по неявной противопоточной схеме на основе метода конечных объемов, что обеспечивает консерватив-

ность численной схемы. Для решения полученной нелинейной системы разностных уравнений использовался двухшаговый неявный алгоритм (шаг «предиктор» – явный на основе линейной экстраполяции по времени, шаг «корректор» – неявный). Дискретные аналоги уравнений на неявном шаге решались методом прогонки для блочно-трехдиагональной системы уравнений. Построение эффективных явных численных схем возможно также на основе MUSCL реконструкции параметров задачи на грани контрольного объема.

5. ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА

Разработанная численная схема для расчета параметров волны прорыва в рамках одномерного подхода тестировалась как на существующих аналитических решениях, так и на экспериментальных данных. Ниже приводятся некоторые примеры верификации методики расчета.

Результаты расчетов для задачи Стокера [1] при различных соотношениях начальных глубин до и после плотины показаны на рис.2 ($X = s/h_1$; $T = t\sqrt{g/h_1}$ – безразмерные координата и время; $\overline{h} = h_2/h_1$ – безразмерная глубина; $\overline{V} = V/\sqrt{gh_1}$ – безразмерная скорость). Расчеты выполнялись на равномерной сетке из 200 узлов, $n = 0$, $T = 50$. Численные решения характеризовались размазыванием фронта на 3 – 4 расчетных узла, при этом устойчивость решения наблюдалась в широком диапазоне изменения исходных данных задачи, в том числе и при распространении волны прорыва по сухому руслу.

Другая тестовая задача – моделирование гидравлического прыжка, образующегося при втекании сверхкритического потока в покоящуюся жидкость, в канале постоянного прямоугольного сечения без уклона и при отсутствии трения ($n = 0$) иллюстрируется рис.3. Число Фруда на входе в канал задавалось равным Fr =3,19 (V = 10 м/с), в начальный момент времени жидкость находилась в покое. Размерность расчетной сетки составляла 101 узел. Аналитическое решение для рассматриваемого примера показывает, что скорость в движущемся гидравлическом прыжке должна равняться половине скорости втекания потока в канал. Отличие численного решения от аналитического не превышало 0,03%.

Сопоставление результатов численных расчетов с данными экспериментальных исследований, приведенных в работах [9,10], представлено на рис.4. Эксперимент проводился в прямоугольном лотке шириной 1,22 м длиной 122 м с постоянным уклоном 0,005. В середине лотка ставилась перегородка, а верхняя часть лотка заполнялась водой. При этом у пере-

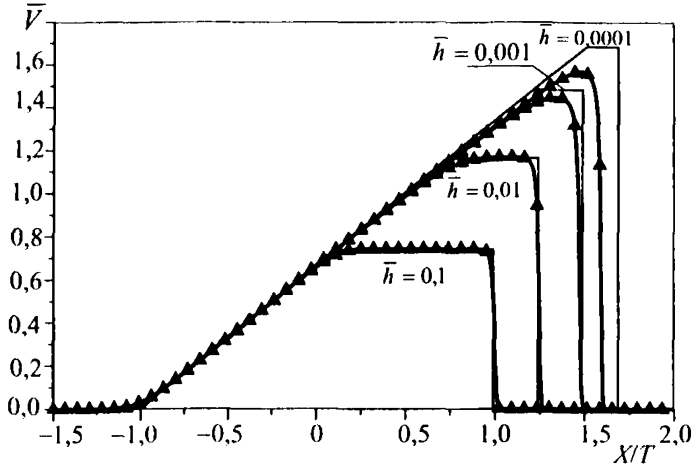


Рис.2. Сопоставление численного и точного решения для задачи Стокера:
—— – точное решение; —▲— – численное решение

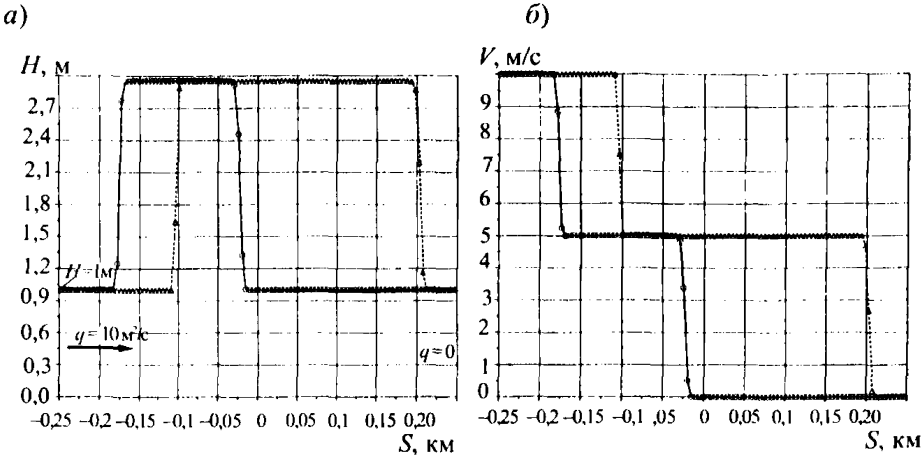


Рис.3. Движущийся гидравлический прыжок: профили свободной поверхности (*а*) и профили скорости (*б*)

городки ($s = 0$) устанавливалась глубина воды $h_1 = 0{,}305$ м , а в начале лотка – нулевая глубина. Нижняя часть лотка до удаления перегородки была сухой. Эксперименты проводились при коэффициентах шероховатости облицовки лотка $n = 0{,}009$ и $n = 0{,}05$. При мгновенном удалении перегородки производились измерения отметок воды в точках $X = -100$ и $X = 0$

($X = s/h_1$). На рис. 4 показано также сравнение полученных численных результатов с данными расчетов [10]. Приведенное сопоставление показывает хорошее согласование численных результатов как с экспериментальными данными, так и с данными расчетов из работы [10]. От традиционных тестовых расчетов для волны прорыва этот пример отличается тем, что в нем учтены трение и уклон дна.

Производились также расчеты параметров волны прорыва для экспериментальных данных, приведенных в работе [11], полученных в прямоугольном лотке шириной 1 м и длиной 7 м, имеющем в нижнем бьефе зону с обратным уклоном. Длина бака, моделирующего верхний бьеф, равна 2,25 м, глубина воды в нем – 0,25 м. Координата $s = 0$ отвечает левой границе бака, до точки $s = 3{,}4$ м дно горизонтально, а далее начинается обратный уклон $i_2 = -10\%$. В начальный момент времени в нижнем бьефе воды нет, $n = 0{,}01$. Эти данные интересны тем, что в процессе эксперимента в области с

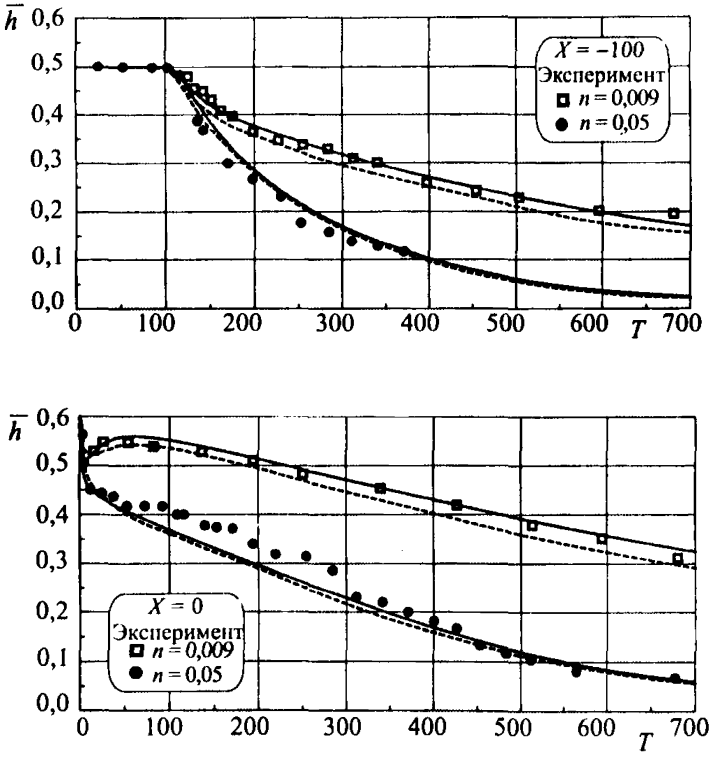


Рис.4. Распространение волны прорыва в наклонном лотке с трением:
- - - - – расчет [10]; —— – расчет с помощью данной схемы

обратным уклоном могло происходить в различные моменты времени и затопление, и осушение дна лотка. На рис.5 показаны результаты расчетов для теста №2 [11]. Размерность расчетной сетки по продольной координате выбиралось равной 351. Сопоставление экспериментальных данных и полученных численных результатов показывает их хорошее согласование.

Расчет гидравлического прыжка в канале прямоугольного сечения без уклона дна проводился для параметров, соответствующих экспериментальным данным, приведенным в [12]. Длина канала составляла 13,9 м, расход Q = 0,053 м³/с, ширина канала 0,45 м, глубина на входе 0,064 м, глубина на выходе 0,168 м, коэффициент шероховатости n задавался равным 0,0085. Расчеты проводились на разностной сетке 140 узлов по

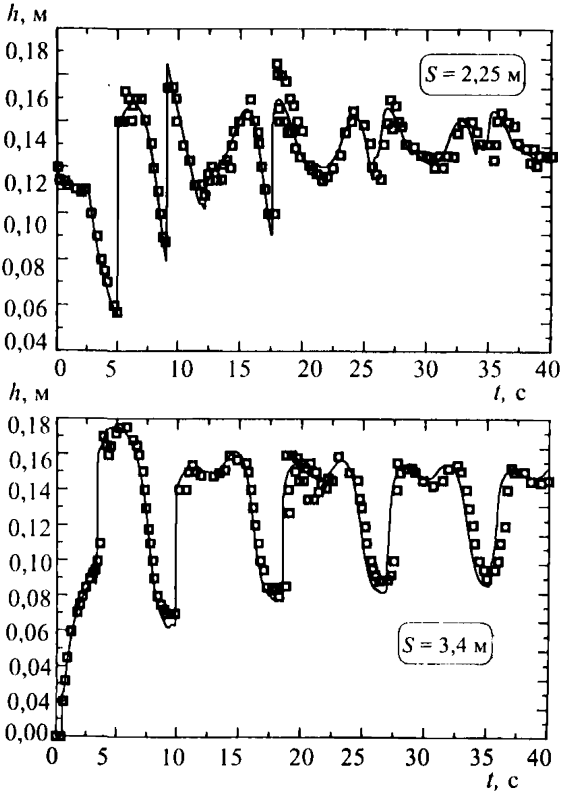


Рис.5. Взаимодействие волны прорыва с наклонной поверхностью, имеющей обратный уклон:
□ – эксперимент; —— – расчет

продольной координате. На рис.6 показано сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными [12] при различном задании n. Следует отметить, что влияние вязкости в основном сказывается на наклоне прыжка, а положение точки начала прыжка (x = 1,5 м) при этом фактически не изменяется.

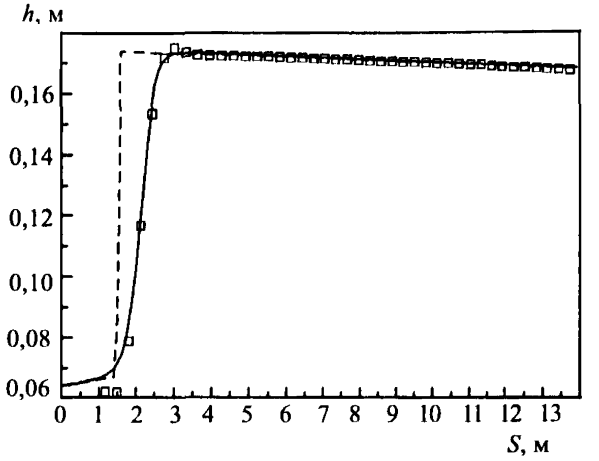


Рис.6. Гидравлический прыжок в лотке без уклона:
□ – эксперимент; ——— – расчет при $\nu^T = 0$ м²/с;
– – – – расчет при $\nu^T = 0{,}3$ м²/с

6. ПРИМЕР РАСЧЕТА НАТУРНОГО ОБЪЕКТА

Примером практического применения описанной методики является расчет распространения волны прорыва при гидродинамической аварии на ЗШО № 3 Серовской ГРЭС, связанной с внезапной просадкой гребня дамбы из-за неисправности отводящего коллектора. Исходная информация о местности и геометрии дна данного ЗШО вводилась с помощью картографического материала, а исходные параметры прорана были взяты из отчета о последствиях имевшей место на этом объекте аварии (ширина прорана – 20 м; глубина – 4,25 м). Топографическими особенностями данного расчета являлись наличие дороги с высотой насыпи 1 м и шириной полотна 6 м у подножия дамбы, а также наличие озера на трассе движения потока. Эти особенности потребовали применения неравномерной сетки с количеством узлов 1000. Устойчивое численное решение при общих зат-

ратах процессорного времени порядка часа было получено при параметре Куранта Cr = 1,0. Сравнение полученных численных результатов с натурными данными по зоне затопления представлено на рис.7.

7. ИНСТРУКЦИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

7.1. Подготовка исходных данных

Исходные данные для расчета волны прорыва

1. Карта с горизонталями местности.

2. Карта отметок дна ЗШО на основе данных батиметрической съемки.

3. Отметки воды в отстойном прудке (прудках) ЗШО и диапазон их колебаний.

4. Характеристики местности вблизи ЗШО и по трассе (трассам) возможного распространения волны прорыва (наличие и описание леса, строений и т.д.).

5. При возможности попадания потока пульпы из ЗШО в реку необходимы характеристики реки в районе возможного впадения в нее потока и вниз по течению:

продольный профиль дна реки и отметок ее свободной поверхности в межень и для паводка заданной обеспеченности (в соответствии с классом декларируемого объекта);

расход в реке среднемноголетний, в межень и для паводка заданной обеспеченности в месте возможного впадения прорывного потока;

характеристика дна реки (скалистое, песчаное, заросшее и т.д.);

желательно иметь кривую связи расходов и отметок свободной поверхности воды для створов, расположенных вниз по течению на значительном расстоянии от створа возможного впадения прорывного потока;

карта отметок дна или глубин для реки.

6. Разрезы ограждающей дамбы.

7. Характеристики автомобильных и железных дорог (высота насыпи и ширина), а также других препятствий, расположенных вблизи ЗШО или пересекающих трассу распространения волны прорыва.

8. Указание на карте местности объектов, на которые следует обратить особое внимание при расчете параметров волны прорыва (объекты, имеющие большую материальную ценность; места скопления людей; объекты, которые могут служить источником экологической опасности).

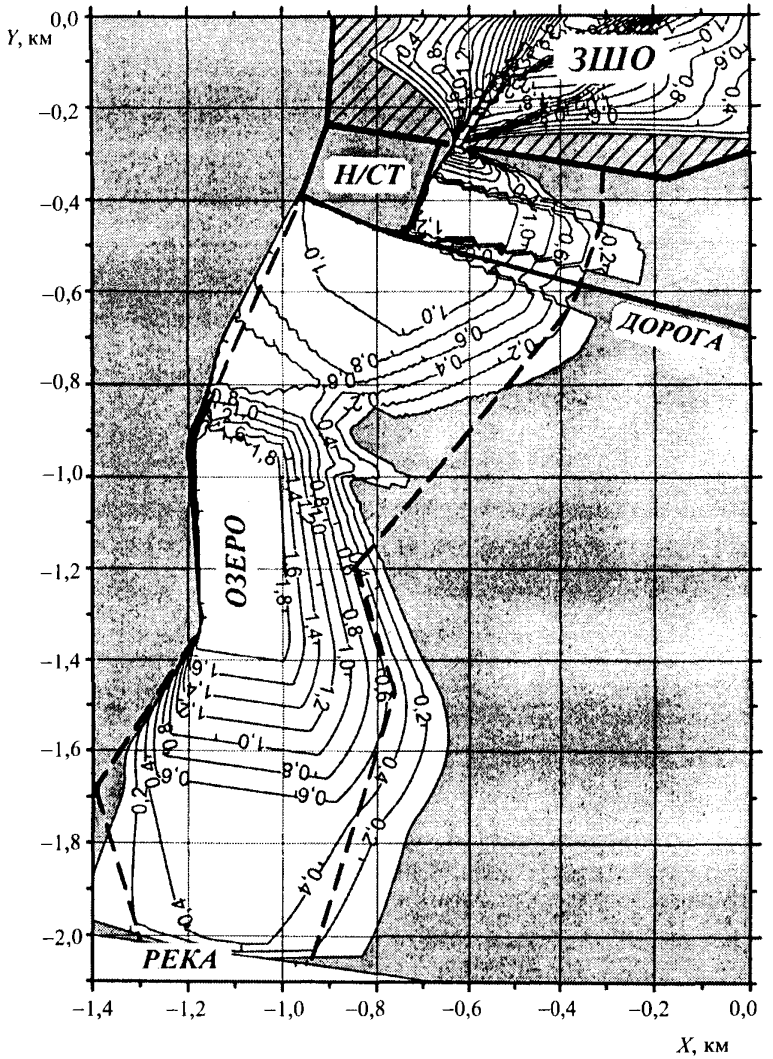


Рис.7. Зона затопления при имевшей место аварии на ЗШО №3 Серовской ГРЭС:
— — — граница зоны затопления по натурным данным;
—1,4 — – расчетные линии глубин

9. Характеристики ЗШМ: плотность, пористость, связность, гранулометрический состав, какой уголь использовался (например: кузнецкий).

Все отметки должны быть даны в одной системе высот.

Место возникновения аварии задается на основании анализа состояния ограждающей ЗШО дамбы. Предполагаемая трасса распространения волны прорыва задается на основании карты прилегающей к ЗШО местности: задаются координаты X, Y точек сечений трассы, в каждом сечении задаются координаты правого и левого края при различных значениях отметок поверхности местности. В ЗШО также задаются координаты X, Y точек сечений и в каждом сечении – координаты правого и левого края при различных значениях отметок поверхности дна. Для случаев, когда задание предполагаемой трассы распространения волны прорыва не представляется возможным, следует использовать методики, основанные на двумерном (плановом) описании прорывного потока.

7.2. Описание программного комплекса

Для реализации разработанной численной методики решения задачи распространения волны прорыва с учетом динамики развития прорана в грунтовых гидротехнических сооружениях был разработан программный комплекс, включающий базу данных, обеспечивающую централизованное хранение исходных данных.

Программный комплекс предназначен для работы на персональном компьютере в среде MS Windows 95/98/NT4/2000. Для нормальной работы программного комплекса необходим персональный компьютер класса Pentium-II и выше с объемом оперативной памяти не менее 64 Мб. Для установки программного комплекса и размещения результатов расчетов должно быть выделено не менее 50 Мб дискового пространства, причем на компьютере должна быть предустановлена среда BDE (Borland DataBase Engeneering) для работы с базами данных. Последняя поставляется совместно с такими программными продуктами фирмы Borland (Inprise), как Delphi (версия 2 и выше) или C++Builder (любая версия), и после установки занимает порядка 10 Мб дискового пространства. Сам программный комплекс представляет собой один EXE-файл (WavePro.exe, специальные DLL библиотеки ему не нужны) и отдельную папку с именем DataBase, где хранятся файлы базы данных.

Запуск программы осуществляется с помощью файла WavePro.exe путем активизации мышкой соответствующей "иконки", при этом на экране монитора появляется следующее меню



Каждый пункт этого меню имеет встроенное (выпадающее при его активизации) меню. Такая структура наглядного управления программным комплексом позволяет:

управлять базой данных (т.е. просматривать описание и параметры любого гидротехнического объекта, для которого выполнялся расчет, вводить и редактировать новые объекты);

запускать программу на счет и, не останавливая ее, следить за текущими результатами расчета (в режиме мультипликации);

управлять окнами, в каждом из которых находится графическая информация;

выводить на экран в виде графиков и карт затопления информацию по текущему расчету или расчету, выполненному ранее и сохраненному на жестком диске;

редактировать графики и карты зон затопления (менять цвета закраски, масштабы по координатным осям и т.п.), изменять подписи под рисунками, увеличивать (Zoom) необходимые области графиков;

печатать графики и карты зон затопления или сохранять их в файле формата BMP, JPEG, EMF.

После ввода необходимой исходной информации в базу данных (см. раздел 7.4) запуск программы на расчет производится либо с помощью функциональной клавиши F6, либо с помощью мышки нажатием на подпункт <Расчет> в пункте основного меню <Выполнить>. Основное окно задачи расчета волны прорыва после запуска программы имеет вид, показанный на рис.8. Здесь и далее пользователь может управлять ходом выполнения задачи с помощью диалоговых окон.

Перед началом выполнения расчета можно просмотреть геометрию всех расчетных сечений трассы волны прорыва. При выполнении программы на экран монитора выводится изменяющийся во времени график изменения отметки свободной поверхности воды в зависимости от координаты вдоль трассы распространения волны прорыва (рис.9) и, при необходимости, в отдельном окне – профиль одного из выбранных расчетных сечений трассы (начальный и текущий – с учетом деформаций дна).

Как база данных, так и встроенный редактор графиков, редактор их печати и другие компоненты графического интерфейса пользователя имеют большое количество "всплывающих подсказок" (аналогично MS Word),

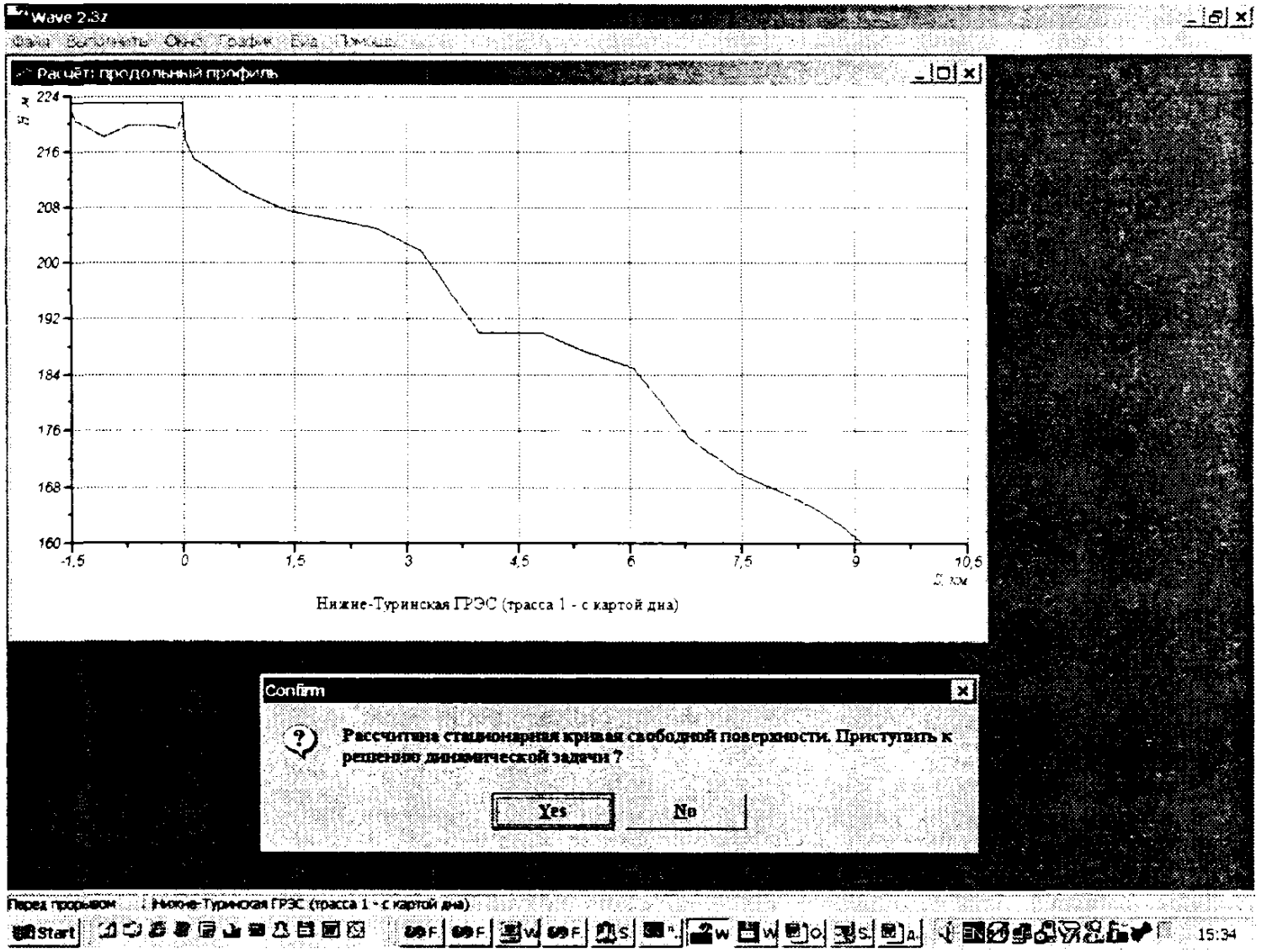


Рис.8. Основное окно задачи сразу после запуска программы на счет

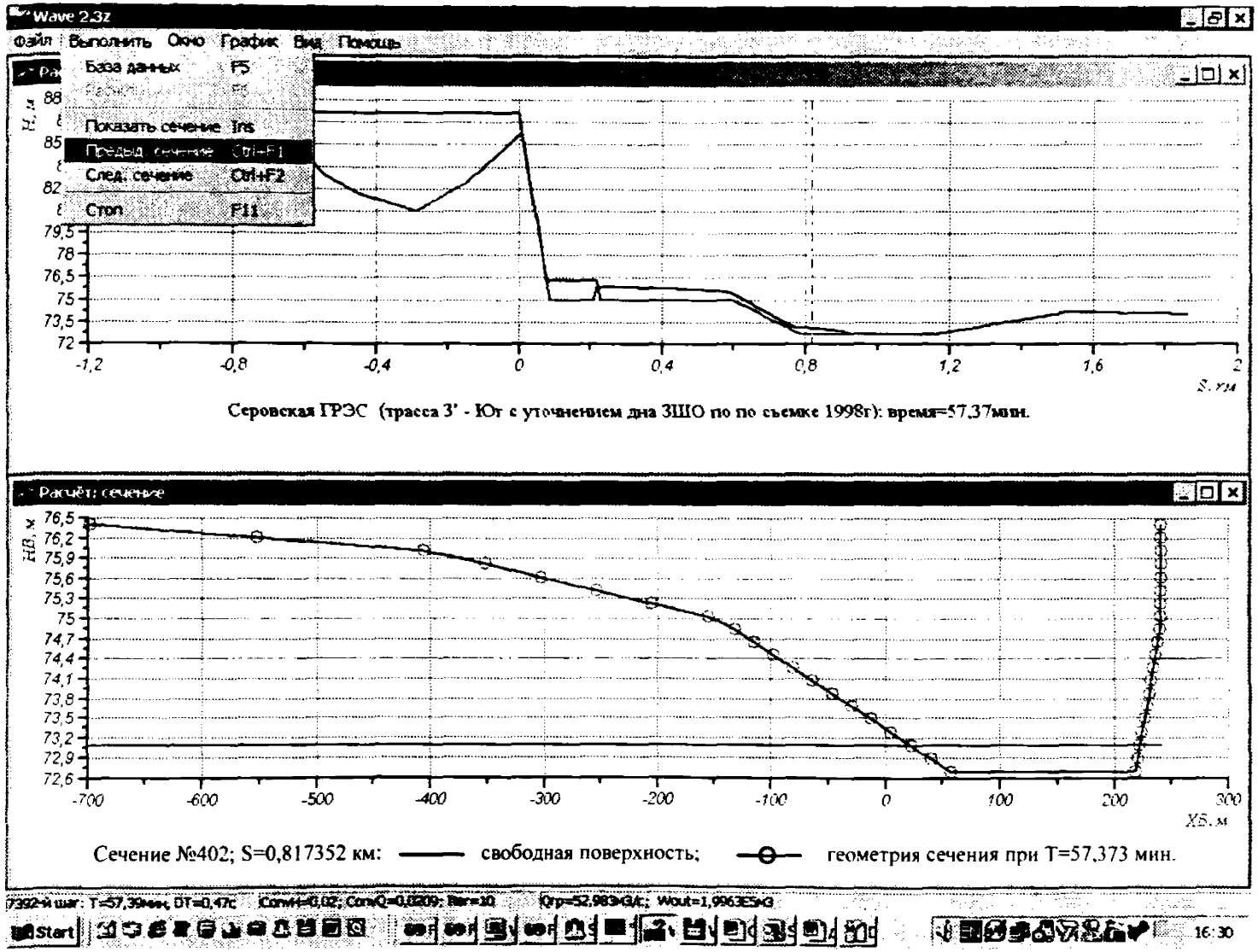


Рис.9. Вид окон программы в процессе выполнения расчета

которые вместе с заголовками кнопок и окон редактирования позволяют работать с программным комплексом без частого обращения к инструкции.

7.3. База данных гидротехнических объектов

Для расчета параметров волны прорыва конкретного гидротехнического объекта (например, ЗШО) требуется большой объем исходной информации: топографическая основа, параметры грунта ограждающей дамбы и золы, описанис информации, которую необходимо получить в результате расчетов и т.д. Оперативный ввод, контроль, коррекция и хранение такой информации на современном уровне требуют использования технологий баз данных (БД). Программный комплекс для расчета параметров волны прорыва в одномерном приближении использует реляционную (многоуровневую) БД, структурная схема которой представлена на рис.10. База данных представляет собой набор связанных таблиц, причем головной является таблица (список) гидротехнических объектов, для которых выполняются расчеты волны прорыва. В таблицах 2-го уровня хранится информация:

о расположении заданных створов (сечений) русла или трассы, по которой может распространяться волна прорыва, и краткое описание этих створов;

о расположении, расходах и времени включения притоков (последнее дает возможность управлять динамикой боковой приточности);

о кривой связи отметки свободной поверхности с расходом в последнем створе;

о координатах контрольных точек, в которых пользователь хочет получить графическую информацию о динамике отметок, глубин, скоростей течения, расходов, концентраций золы и наносов и т.д.

о контрольных моментах времени, для которых пользователь хочет получить графическую информацию о распределении вдоль трассы распространения волны прорыва глубин, скоростей течения, расходов, концентраций золы и наносов и т.д.

БД включает в себя только одну таблицу 3-го уровня, в которой хранятся координаты точек, задающих профиль левого и правого берега сечений русла и зависимость коэффициента шероховатости в формуле Маннинга от глубины потока. Такая таблица есть у каждого заданного пользователем сечения трассы (створа).

Для удобства использования и уменьшения вероятности ошибок в базу данных включены следующие средства:

контроль правильности вводимой информации (формат чисел, недопущение незаполненных полей, диапазон допустимых значений параметров);

задание "по умолчанию" приемлемых значений параметров вычислительного алгоритма;

графическое представление табличных данных непосредственно в процессе их ввода;

копирование и вставка в базу данных с последующей корректировкой всех параметров и связанных таблиц гидротехнического объекта, отдельных сечений его трассы или точек по берегам этих сечений (режим "Copy-Paste").

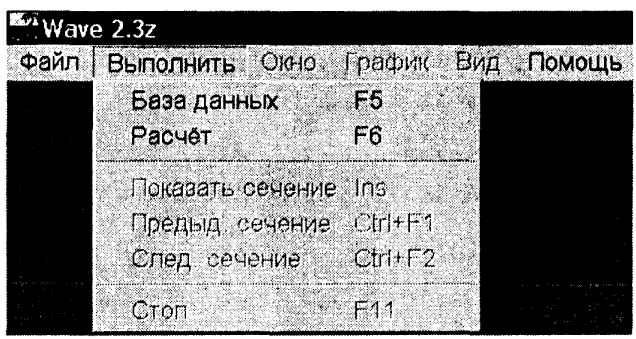
База данных интегрирована в программный комплекс для расчета параметров волны прорыва, особенности работы с ней описаны в п.7.4.



Рис.10. Структурная схема базы данных гидротехнических объектов (звездочками помечен уровень таблиц в БД)

7.4. Порядок подготовки исходных данных

Для того, чтобы попасть в базу данных надо либо нажать функциональную клавишу F5, либо в основном меню щелкнуть мышкой на соответствующем пункте. Управление базой данных осуществляется с помощью окна, оформленного в виде блокнота, отдельные страницы которого представлены на рис.11 – 14. Сохранение данных в БД происходит автоматически при нажатии кнопки «ОК» или закрытии окна «База данных». Предусмотрено блокирование перелистывания страниц блокнота или закрытия всего окна «База данных» при неправильном или неполном вводе информации о гидротехническом объекте. Графики на рис.13, *б* (страница блокнота «Точки сечений») показывают профили левого или правого берегов, или профиль коэффициента шероховатости, а график на странице *блокнота «Граничные условия» представляет собой кривую связи в последнем* расчетном створе.



Первоначальное распределение отметок свободной поверхности воды можно либо задать на страничке блокнота «Сечения», либо рассчитать с помощью решения стационарной задачи при известном начальном расходе, задав соответствующие признаки на страничке «Граничные условия».

Ввод информации в базу данных имеет определнные особенности. Для ввода параметров нового объекта (а так же для выбора из списка одного из введенных ранее) следует перейти на 1-ю страничку блокнота редактирования БД (рис.11). Ввод нового объекта осуществляется кнопкой «+» на панельке навигатора БД (она справа наверху, под ней надпись «Объект создан»). Затем в пустой строке списка гидротехнических объектов следует ввести любое название объекта, а в окне внизу можно ввести его словесное

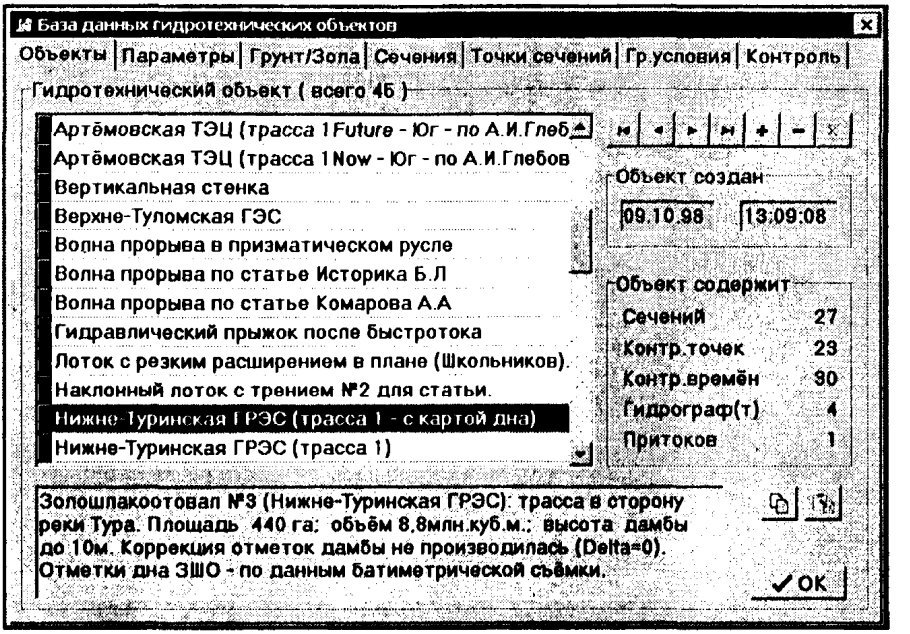
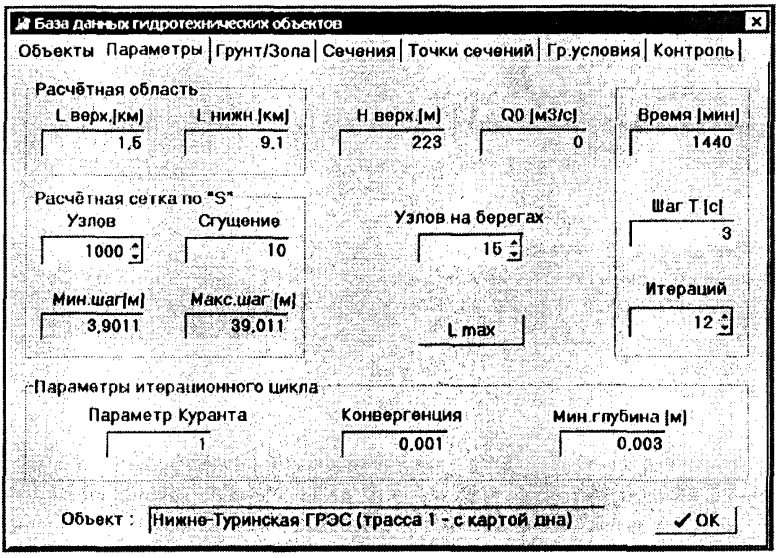


Рис.11. Окно «База данных» программного комплекса расчета параметров волны прорыва: страница «Объекты»

описание неограниченной длины. Иногда удобнее новый объект переделать из уже имеющегося объекта в БД. В этом случае можно использовать кнопки «копировать» и «вставить» – они расположены над кнопкой «ОК» в правом нижнем углу. Данные на панелях «Объект создан» и «Объект содержит» заполняются автоматически и не подлежат редактированию.

После ввода названия и описания объекта можно перейти на вторую страницу блокнота редактирования БД (рис.12, *а*). Параметры $L_{верх}$ и $L_{нижн}$ ограничивают длину расчетной области в верхнем и нижнем бьефах (их надо задавать с помощью карты). Параметр $H_{верх}$ – это начальная отметка в верхнем бьефе перед плотиной или дамбой. Параметром «Сгущение» можно задать более мелкую сетку в районе прорана ($s = 0$), при задании его равным 1,0 сетка будет равномерной. Параметрами «Время», «Шаг по времени» и «Итерации» задаются, соответственно, общее время расчета, максимальный (с точки зрения необходимой пользователю подробности расчета) шаг по времени и количество итераций метода (алгоритм работоспособен и без итераций – можно задать здесь «1», но с их увеличением снижаются требования к параметру Куранта). Q_0 – расход вдоль

а)



б)

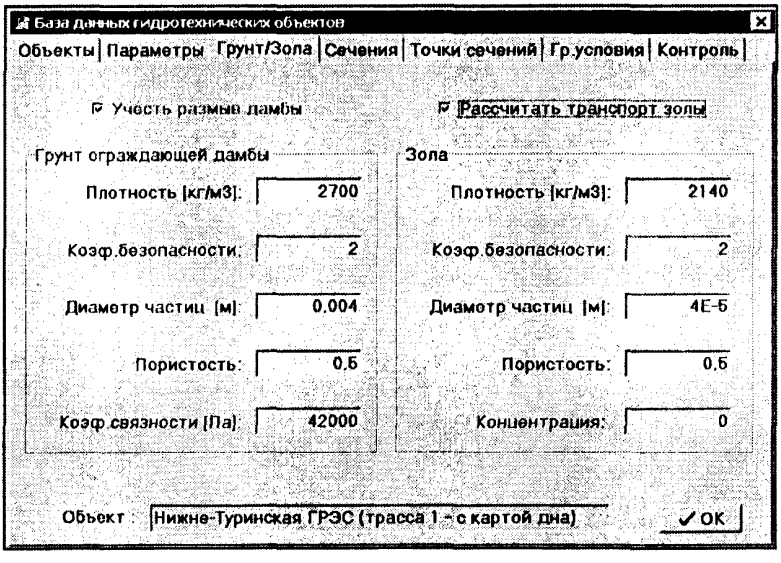


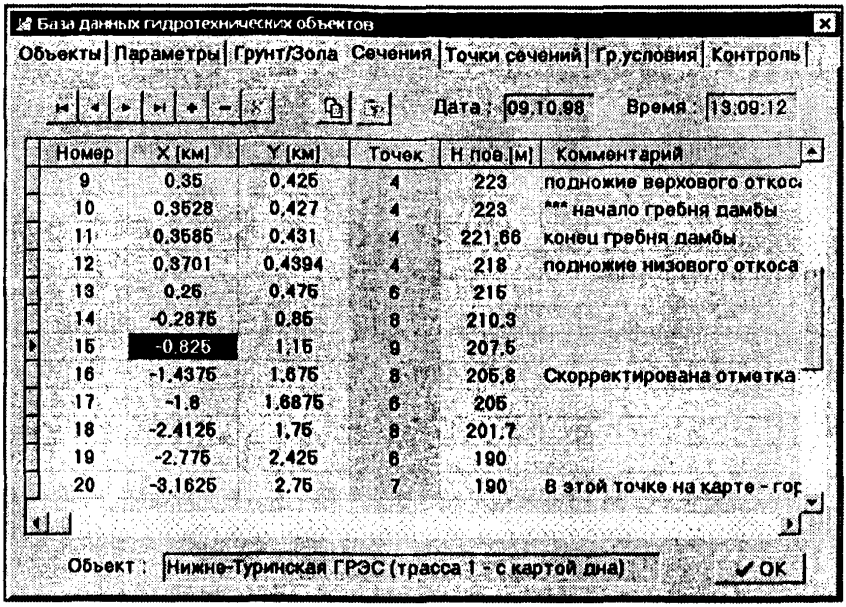
Рис.12. Окно «База данных» программного комплекса расчета параметров волны прорыва: страницы «Параметры» (*а*) и «Грунт/Зола» (*б*)

трассы растекания потока: для ЗШО он, как правило, нулевой, а для плотины электростанции равен начальному расходу в нижнем бьефе. Параметр Куранта можно выбирать в диапазоне от 0,5 до 3,0. Первое из этих значений заложено в БД «по умолчанию»: оно гарантирует устойчивость расчета, но требует для вычислений больше времени. Второе значение (3.0) можно уточнить при пробных расчетах. Для остальных параметров рекомендуется использовать параметры, заложенные в БД по умолчанию. С помощью кнопки [$L_{макс}$] на этой же странице можно получить длину расчетной области вдоль искривленной трассы растекания по полученным с помощью карты координатам сечений, заданных на странице блокнота БД «Сечения».

На странице блокнота редактирования базы данных «Грунт/Зола» (см. рис.рис.12, *б*) можно изменить *средние* параметры частиц, а также включить/выключить расчет транспорта золы и деформации русла. При задании значения параметра «Концентрация» на панели «Зола», равным нулю, концентрация частиц золы в сечении прорана рассчитывается по транспортирующей способности потока, в противном случае – используется введенное в этом окне значение из БД (объемная безразмерная концентрация).

Снятая с карты местности топографическая информация закладывается в базу данных на страницах «Сечения» и «Точки сечений» (рис.13). В верхней левой части этих страниц имеются панели навигаторов базы данных, а так же кнопки «копировать» и «вставить». Для вставки или удаления сечений или точек сечений можно также использовать клавиши [Insert] и [Delete] на клавиатуре. Номера сечений (таблица на странице «Сечения») не обязательно должны идти с шагом через 1: их цель – задать порядок расположения сечений на трассе растекания, который при сильно искривленной трассе не всегда очевиден. Координаты X и Y в этой таблице определяют положение точек трассы (опорных точек) – как правило, но не всегда, это точки сечений с наибольшей глубиной. Начало отсчета этих координат может быть выбрано произвольно – это влияет только на оси координат построенных карт. Количество введенных точек, определяющих каждое сечение, вводить не надо – оно подсчитывается автоматически. Начальные отметки свободной поверхности воды $H_{пов}$ также вводятся в таблице (рис. 13, *б*), но они будут использованы, только если не будет задан режим расчета начального профиля свободной поверхности (см. описание страницы «Граничные условия»). Форма сечений, а также коэффициент шероховатости n задается в табличном виде и контролируется автоматически изменяющимся графиком на странице блокнота редактирования БД «Точки сечений» (рис.13, *б*). В этой таблице H – это отметка точки (в первой точке глубина наибольшая), а $B_{лев}$, $B_{пр}$ – расстояния от опорной точки до берегов.

а)



б)

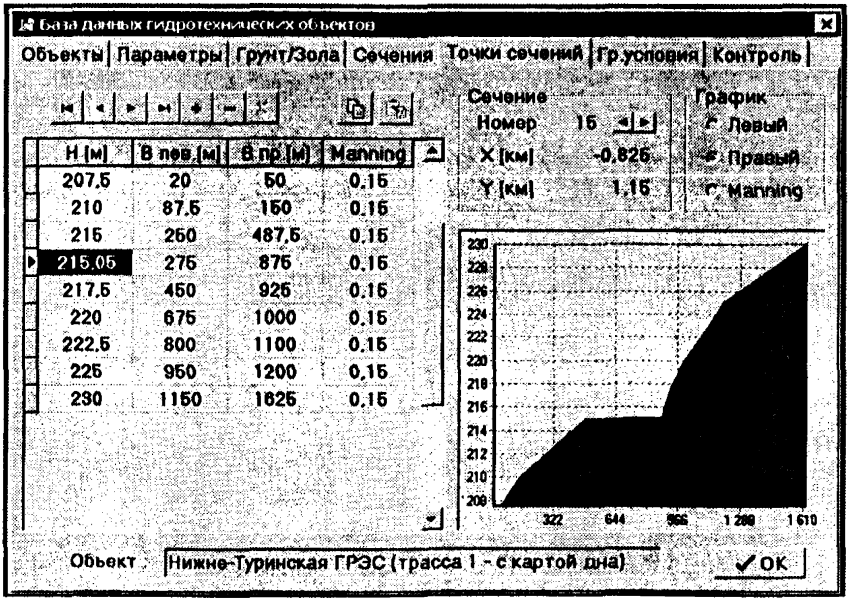


Рис.13. Окно «База данных» программного комплекса расчета параметров волны прорыва: страницы «Сечения» (*а*) и «Точки сечений» (*б*)

Одно из них может быть отрицательным, если точка с наибольшей глубиной не совпадает с опорной точкой сечения. В последнем столбце (Manning) задается коэффициент шероховатости *n* (для русла и поймы могут быть заданы различные коэффициенты *n*). С помощью упрощенного навигатора на этой же страничке (он на панели «Сечение») можно быстро перейти к соседнему сечению, а с помощью кнопок на панели «График» можно изменить информацию, для которой выполняется графический контроль: форма левого берега сечения, правого берега или вертикальный профиль коэффициента шероховатости *n*.

На последних двух страницах блокнота редактирования БД (рис.14) вводится информация:

о кривой связи расходов с глубинами на правой границе (в виде таблицы на рис. 14, *а*); введенная информация автоматически отображается на графике;

о боковых притоках и моментах времени, с которых они начинают "работать";

о расположении контрольных точек вдоль расчетной трассы (левая таблица на рис. 14, *б*); в этих точках будет выполняться запоминание результатов расчетов для построения графиков отметок, расходов и т.д.;

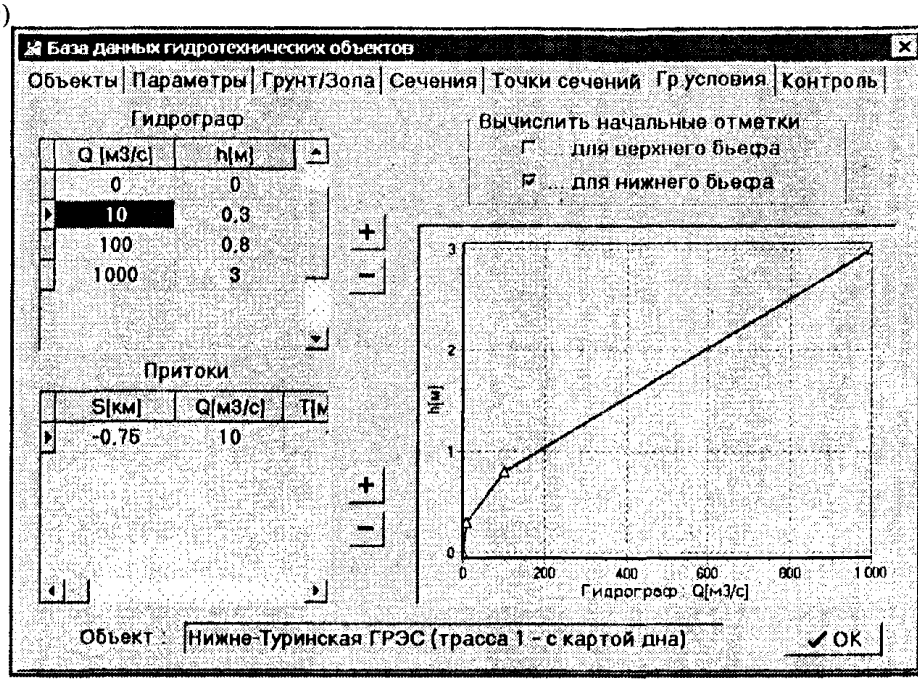
о контрольных моментах времени (правая таблица на рис. 14, *б*); в эти моменты времени будет выполняться запоминание результатов расчетов для построения графиков отметок, расходов и т.д.

После завершения ввода информации необходимо закрыть окно (блокнот) редактирования базы данных кнопкой [OK] или [X].

7.5. Обработка полученных результатов (постпроцессор)

После завершения расчета графическую информацию о параметрах волны прорыва (зону затопления, динамику изменения поверхности воды, изменения скорости потока и расхода, динамику изменения отметки дна и т.п.) можно просмотреть на экране монитора и вывести на печать с помощью выбора соответствующих подпунктов в пункте основного меню <Файл>. Для всех графиков и карт зоны затопления предусмотрены обширные возможности редактирования (подрисуночного текста, параметров линий, разметки осей и т.д.). Кроме того, имеется возможность "Zoom" – выделения с помощью мышки и увеличения любого фрагмента графика или карты. Интерфейс встроенного редактора достаточно прост и не требует пояснений (как и интерфейс базы данных, он построен в виде окна-блокнота).

а)



б)

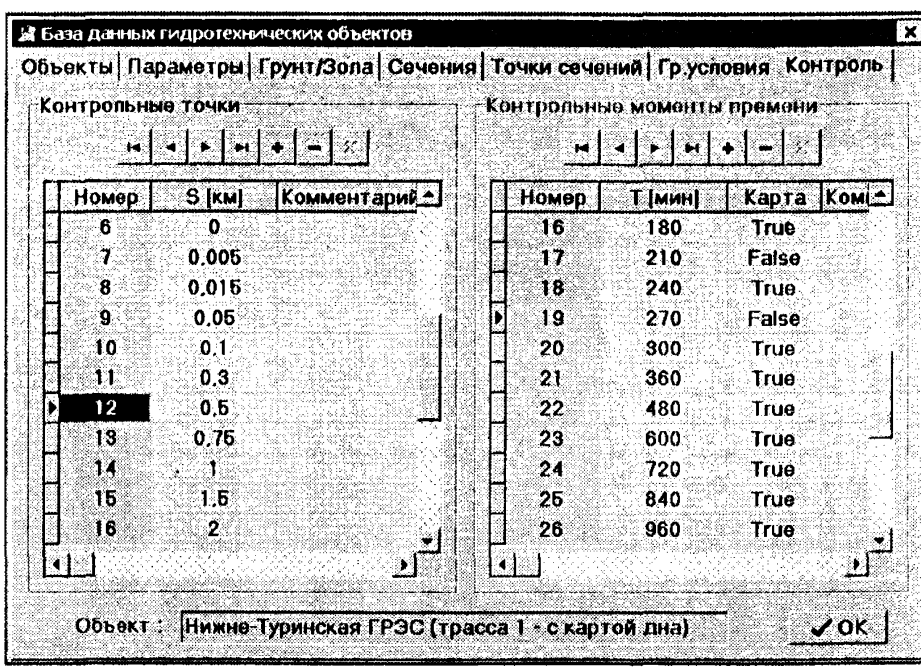


Рис.14. Окно «База данных» программного комплекса расчета параметров волны прорыва: страницы «Граничные условия» (*а*) и «Контроль» (*б*)

Графический интерфейс (постпроцессор) позволяет построить, при необходимости,отредактировать и напечатать:

графики зависимости расхода и отметки свободной поверхности от времени в любой точке трассы распространения волны прорыва;

графики зависимости осредненных по сечениям трассы скоростей потока от времени в любой точке;

графики зависимости расхода, осредненной по сечению скорости потока и отметки свободной поверхности от координаты вдоль трассы в любой момент времени;

графики зависимости от координаты (для заданных моментов времени) и от времени (для заданных координатами контрольных точек) осредненных по сечениям безразмерных концентраций взвешенных частиц золы;

графики зависимости от времени объемов жидкости, наносов, золы, прошедших через выбранные сечения трассы;

карту зоны затопления в любой момент времени с указанием либо текущих глубин затопления, либо максимальных глубин затопления от начала аварии до выбранного момента времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dam-Break Flood Analysis.** Committee on hydraulics for dams. ICOLD. Bulletin 111. 1998.

2. **Кюнж Ж.А., Холли Ф.М., Вервей А.** Численные методы в задачах речной гидравлики: практическое применение / Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат. 1985.

3. **Климович В.И., Прокофьев В.А.** Расчет параметров волны прорыва и определение границы зоны затопления при аварии на ЗШО // Гидротехническое строительство. 2001. №1. С. 38-44.

4. **Дебольский В.К., Зайдлер Р., Массель С. и др.** Динамика русловых потоков и литодинамика прибрежной зоны моря. М.: Наука. 1994.

5. **Garcia-Martinez R., Saa Vedra I., Febres de Power B., Valera E., Villoria C.** A two dimensional computational model to simulate suspended sediment transport and bed changes // Journal of Hydraulic research. 1999. Vol. 37. №3. pp. 327-344.

6. **Гидравлические** расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат. 1988.

7. **Raudkivi A.J.** Loose Boundary Hydraulics. A.A.Balkema Publishers. Rotterdam. 1998.

8. **Прудовский А.М.** Образование прорана при прорыве земляной плотины // В сб: Безопасность энергетических сооружений. М.: НИИЭС. 1998. Вып. 2. С. 67-79.

9. **Waterways** Experiment Station, Floods resulting from suddenly breached dams. Misc. Paper No 2-374. US Army Corps of Engineering. Vicksburg. Miss., Report 1. Conditions of Minimum Resistance. 1960; Report 2. Conditions of Hight Resistance. 1961.

10. **Zhang H., Youssef H., Long H.D., Kahawita R.** A 1-D numerical model applied to dam break flows on dry beds// Journal of Hydraulic research. 1992. Vol. 30. № 2. pp. 211-224.

11. **F.Aureli, P.Mignosa, M.Tomirotti.** Numerical simulation and experimental verification of dam-break flows with shocks// Journal of Hydraulic research. 2000. Vol. 38. №3.

12. **T.Molls, M.H.Chaudhry.** Depth-averaged open-channel flow model // Journal of Hydraulic Engineering. 1995. Vol. 121. №6.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие положения 3
2. Математическая модель расчета параметров волны прорыва и транспорта ЗШМ 4
3. Динамика развития прорана 7
4. Численный алгоритм 8
5. Верификация методики расчета 9
6. Пример расчета натурного объекта 13
7. Инструкция пользователя 14
   - 7.1. Подготовка исходных данных 14
   - 7.2. Описание программного комплекса 16
   - 7.3. База данных гидротехнических объектов 20
   - 7.4. Порядок подготовки исходных данных 22
   - 7.5. Обработка полученных результатов (постпроцессор) 27

Список литературы 29

Редактор *Т.С. Артюхина*
Корректор *Т.М. Бовичева*
Компьютерная верстка *Н.Н. Седова*

Подписано в печать 15.02.2006.
Формат 60x90 1/16. Бумага типографская № 1. Печать офсетная.
Печ.л. 2,00. Тираж 300. Заказ 5.

Издательство ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева».
Типография ООО «Дом Шуан».
195220, Санкт-Петербург, Гжатская ул., 21.

gost.e-ecolog.ru