НАУЧНЫЕ РАБОТЫ

ГНИНГИ МО РФ; МГАВТ

68

В.А. Михальский, В.А. Катенин, А.В. Бойков. **Об автоматическом управлении движением судна по заданной траектории**

Московская государственная академия водного транспорта (МГАВТ)

70

В.П. Ментюков, В.В. Письменский. **Обоснование методики расчета параметров обратного фильтра в основании судоходного шлюза с конструктивными элементами, выполненными из нетканых геосинтетических материалов**

Новосибирская государственная академия водного транспорта (НГАВТ)

75

С.В.Моторин, Н.В.Голышев, А.В. Ботвинков, А.А. Тюменцев, А.Р. Абдрашев. **Пространственно-спектральный подход в информационном обосновании требований к изыскательским работам на ВВП**

НИИ энергетических сооружений (НИИ ЭС); Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ)

82

В.В. Беликов, А.С. Завадский, С.Н. Рулева, Р.С. Чалов. **Результаты моделирования спрямления русла р. Оби в районе г. Колпашево**

УЧРЕЖДЕНИЯ: ГНИНГИ МО РФ; МГАВТ

ТЕМА: Об автоматическом управлении движением судна по заданной траектории

АВТОРЫ: В.А. МИХАЛЬСКИЙ, кандидат технических наук, доцент (ГНИНГИ МО РФ); В.А. КАТЕНИН, доктор военных наук, профессор (ГНИНГИ МО РФ); А.В. БОЙКОВ, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Судовождение» (МГАВТ)

СОДЕРЖАНИЕ ЗАДАЧИ

Автоматическое управление плаванием судна по заданной траектории движения (ЗТД) осуществляется по командам в авторулевой (АР), которые вырабатывает электронная картографическая навигационная информационная система (ЭКНИС) или другая навигационная вычислительная система. Задача управления движением решается на основании информации, которая включает:

а) последовательность маршрутных точек ЗТД, часть из которых являются поворотными с одного прямолинейного (локсодромического) участка маршрута на другой;

б) текущие обсервованные координаты судна (той его точки (Ц), из которой выполняется управление движением), измеренные в общем случае по глобальной спутниковой навигационной системе (GPS) и поступающие в ЭКНИС практически непрерывно;

в) вводимые судоводителем параметры управления движением судна. Этими параметрами в ЭКНИС типа «Сегмент» являются следующие:

– допустимое отклонение L судна от заданной линии пути (ЗЛП) на текущем участке ЗТД. Когда фактическое отклонение $L_Ф$, вызванное сносом судна течением и ветром и определяемое по обсервациям, становится равным допустимому, т.е. $L_Ф = L$, ЭКНИС вырабатывает команду в АР на изменение удерживаемого курса на угол ΔK в сторону ЗЛП для возвращения судна на ЗТД;

– угол ΔK изменения курса судна в сторону ЗЛП. По умолчанию $\Delta K=5^\circ$ или курс направляется в очередную поворотную (маршрутную) точку ЗТД;

– радиус круга (области поворота) $R_{ОП}$ с центром в точке начала поворота. При входе судна в этот круг ЭКНИС вырабатывает сигнал поворота на курс, ведущий в следующую маршрутную точку.

В настоящее время в навигации отсутствуют рекомендации по количественному определению параметров управления движением судна L, ΔK и $R_{ОП}$. Данная статья посвящена обоснованию и выработке таких рекомендаций для режимов движения судна в стесненных условиях и в океане (в открытом море). Данные рекомендации могут быть использованы в полном объеме на судах класса река–море и на всех речных судах при плавании в плохую видимость и на устьевых участках рек, где действуют морские правила плавания.

ПЛАВАНИЕ В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Целевая установка управления движением состоит в проводке судна по ЗТД при минимальных отклонениях от нее и выполнении условия допустимой дискретности включения рулевого привода.

Факторы, смещающие судно с ЗТД. К ним относятся погрешности средств обсервации и снос судна течением и ветром.

Точность определения места судна по GPS характеризуется следующими статистическими показателями, полученными в результате специального исследования и не противоречащими [1, 2]: радиальная средняя квадратическая погрешность (СКП) обсервованного места (ОМ) в варианте Р-кода $M_{ОМ}$=3-4 м в условиях спокойной ионосферы и МОМ до 8-10 м в условиях возбужденной ионосферы (в период ±1,5 ч относительно моментов захода и восхода Солнца, во время магнитных бурь, зимой в высоких широтах); интервал корреляции флюктуационных погрешностей τ_K=0,5 мин, полных погрешностей – 1 сутки и более; коэффициент корреляции погрешностей широты и долготы $r_{ШД}\approx 0$. В качестве закона распределения погрешностей может быть принят закон Лапласа при оценивании точности ОМ по априорным данным или закон Гаусса при автоматическом оценивании точности ОМ в процессе измерений координат по конкретному количеству спутников в рабочем созвездии.

В варианте С/А-кода радиальная СКП места $M_{ОМ}$=35-15 м плавно уменьшается с увеличением числа спутников в рабочем созвездии от 5-7 до 11-12.

Дифференциальная подсистема GPS характеризуется величиной $M_{ОМ}\approx 0{,}5D/100$, м, где $D\leq 300$ миль – расстояние от судна до контрольной станции подсистемы в милях. При $D\leq 200$ миль $M_{ОМ}\leq 1$ м.

Влияние течения и ветра на траекторию движения судна проявляется в сносе судна с ЗЛП. В рассматриваемых условиях действуют вдольбереговые течения, течения проливов и заливов, которые отличаются сложным характером поля и могут значительно превосходить по скорости течения открытого моря в прилежащих районах. При входе судна в портовую зону большинства портов администрация порта сообщает на судно необходимую для прохода в порт информацию, в том числе скорость и направление течения в районе подходного канала и/или элементы сноса (определяются по ОМ).

Характер движения судна. Для компенсации бокового сноса течением и ветром изменяют курс судна навстречу силе сноса, и судно идет под некоторым углом β к ЗЛП. Полоса воды, занимаемая судном, становится больше максимальной ширины B корпуса судна на величину 2b. Эта полоса равна [3] $A'=B+2b=L\sin\beta+B\cos\beta=LA''$, где L – длина судна по ватерлинии. Значения коэффициента A" приведены в таблице в зависимости от соотношения размерений судна L/B и угла β.

Кроме того, в этих условиях приходится чаще перекладывать руль для удержания судна на ЗЛП. Это дополнитель-

Значения коэффициента A"

Угол β	L/B = 6	L/B = 8	L/B = 10	L/B = 12
3°	0,218	0,172	0,152	0,136
6°	0,270	0,229	0,204	0,187
9°	0,321	0,280	0,255	0,239
12°	0,371	0,330	0,204	0,187

но увеличивает ширину полосы воды, занимаемой судном, до величины $A=A'+B=LA''+B$. **Например, при** $L=120$ **м,** $B=15$ **м и** $\beta=6^\circ$ **ширина полосы воды** $A=42,6$ **м без учета погрешностей, вносимых средствами ОМ и автоматического управления.**

Расчет параметров автоматического управления движением судна по ЗЛП предполагает использование допустимого отклонения $L_Д$. **и дискретности** t_{AP} **включения АР. Если принять допустимое отклонение** $L_Д=0$ **и не ограничить** t_{AP}, **то ЭКНИС начнет выдавать на АР хаотические ложные команды, обусловленные случайными погрешностями средства ОМ. Если, наоборот, принять величину** $L_Д$ **необоснованно большой, то не будет выполняться условие допустимого отклонения судна от ЗЛП и может возникнуть опасность посадки судна на мель. Суммарная ширина** $A_{МП}$ **полосы воды, занимаемая судном (маневровой полосы (МП) с учетом величины** $L_Д$ **и погрешностей ОМ может быть принята равной:**

$$A_{МП}=A+2L_Д+2K_{P1q}m_z, \qquad (1)$$

где K_{P1q} **– коэффициент предельного перехода от СКП** $m_z=0,7M_{OM}$ **обсервованного места по любому направлению оси 0z, к предельной погрешности, соответствующей вероятности P, для q-го закона распределения погрешностей GPS. При предварительных расчетах предельных погрешностей целесообразно в качестве априорного вида закона распределения принять закон Лапласа (Л). При решении задачи в море одновременно с обсервациями по GPS можно использовать закон Гаусса (Г) и текущие значения** M_{OM}, **вырабатываемые приемоиндикатором GPS. Таблица двусторонней функции распределения закона Лапласа имеется в [4 (табл. 10.3.1)]. Коэффициенты** $K_{P1Л}$ **для вероятностей 0,95; 0,99 и 0,997 для закона Лапласа равны соответственно 2,39; 3,7 и 4,64 (для закона Гаусса – соответственно 1,96; 2, 58 и ≈3.).**

Величину $L_Д$ **выбирают из условия достаточно малого отклонения оси маневровой полосы от ЗЛП при удовлетворяющем значении интервала времени** t_{AP}. **Один из вариантов решения этой задачи предполагает определение СКП** m_V **скорости** $V_Б$ **бокового сноса судна по формуле** $m_V\approx\sqrt{2}\ m_z/\Delta t = M_{OM}/\Delta t$, **где** Δt **– интервал времени между ОМ, по которым определяется скорость** $V_Б$. **Расчеты показывают, что с 99%-м обеспечением при** $\Delta t=40–60$ **с оценка остаточной после ввода угла** β **скорости бокового смещения судна с ЗЛП не превышает 0,3 м/с в благоприятных условиях для работы GPS и 0,7 м/с – при неблагоприятных условиях (точность оценки может быть повышена до, например, 0,3 м/с пропорциональным увеличением времени** Δt **до 90-150 с).**

Для обеспечения навигационной безопасности плавания (НБП) по каналу (фарватеру, проходу) должно выполняться условие $D_{НО}–A_{МП}\geq D_Б$, **где** $D_{НО}$ **– расстояние от ЗЛП до ближней границы канала или навигационной опасности (НО);** $D_Б$ **– безопасное расстояние, рассчитываемое с учетом предельных погрешностей места судна и границы НО** $m\hat{}_{НО}$ **в соответствии с [5, 6], а также поправки** $\Delta_{БЭ}$ **на влияние «берегового эффекта». С использованием (1) максимальное значение допустимого отклонения** $L_Д$ **должно удовлетворять условию:**

$$L_{Дmax}<D_{НО}–0,5A–K_{P1Г}m_z–m\hat{}_{НО}–\Delta_{БЭ}. \qquad (2)$$

При выполнении условия (2) величину $L_Д < L_{Дmax}$ **можно принять, ориентируясь по ширине полосы A и дискретности включения рулевого привода. Если, например, при** $A=42,6\approx44$ **м принять** $L_Д=11$ **м, то занимаемая судном полоса воды увеличится на 50%, а дискретность** $t_{AP}=L_Д/2,58m_V\approx11/0,3=27$ **с. Если эта величина слишком мала и требуется увеличить ее до 60 с, то нужно принять** $L_Д = 25$ **м. При этом маневровая полоса увеличивается до** $A_{МП}\approx110$ **м (с вероятностью нахождения судна в ней 0,99).**

Другие параметры автоматического управления движением судна целесообразно принять равными: $R_{ОП}=A_{МП}$ **(рассчитанной для вероятности 0,997, чтобы не пройти мимо точки поворота);** ΔK **– по умолчанию или в соответствии с обстоятельствами плавания.**

ОКЕАНСКОЕ ПЛАВАНИЕ

При плавании по рекомендованным океанским и морским путям точное удержание судов, следующих в обоих направлениях, например по линии ортодромии, привело бы к тому, что десятки раз за сутки им пришлось бы расходиться в ситуациях сближения «прямо или почти прямо друг на друга», «на курсах, пересекающихся под острым углом», «обгона» и «догона при близких курсах». На эти ситуации приходится более 50% столкновений судов, и увеличивать количество таких ситуаций вряд ли целесообразно. Кроме того, это привело бы к значительной неоправданной нагрузке рулевого привода и незначительному (≈0,4%) увеличению времени плавания. Поэтому целесообразно расположить маневровую полосу несколько правее линии рекомендованного пути, определить ее ширину $A_{МПок}=3,46\sigma_T\tau_T$ **и принять** $L_Д=0,5A_{МПок}$, **обеспечивая движение посредине маневровой полосы** $A_{МПок}$. **Здесь** σ_T **– среднее квадратическое значение модуля вектора скорости течения, а** τ_T **– интервал корреляции течения в той области океана, где находится судно;** $3,46=\sqrt{12}$ **– коэффициент предельного перехода для закона равномерной плотности распределения, которому подчиняется модуль вектора скорости течения, при вероятности** $P>0,95$.

В среднем по Мировому океану $\sigma_T=0,7$ **уз, увеличивается в 2 раза в областях очень сильных течений, например Гольфстрима, и уменьшается в 2 раза в областях слабых течений, как Иберийский район Атлантического океана. Среднее значение** $\tau_T=3$ **ч при скорости судна 15 уз увеличивается до 9 ч в первом и уменьшается до 1,7 ч во втором случае. Поэтому среднее значение** $A_{МПок}=7,5$ **мили может увеличиться до 45 миль или уменьшиться до ≈2 миль. Такой выбор величины** $A_{МПок}$ **позволяет значительно сократить суммарную продолжительность работы рулевого привода судна и увеличить время плавания благодаря возможности изменения направления течения за время, превышающее интервал** τ_T.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Базаров Ю.И. Состояние и перспективы ГЛОНАСС.// IV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, 26-28 марта 1997 г. – С-Пб.: ЦНИИ «Электроприбор», 1997. – С. 5-7.
2. Катенин В. А., Дмитриев В. И., Михальский В. А. Навигационное обеспечение судовождения. С-Пб ГУВК, 2005. –429 с.
3. Руководство по оперативному определению проходной осадки судов на подходных каналах морских портов. РД 31.63.01 – 83.– М.: Мортехинформация, 1983. 18 с.
4. Методики вероятностных расчетов при решении навигационных задач на кораблях и судах ВМФ./ Михальский В. А., Рябоконь В. А. – С-Пб.: ГУНиО, 1999. – 218 с.
5. Михальский В. А., Тюлькин М. В. Оценка навигационной безопасности подводного плавания вблизи точечных опасностей. / Навигация и гидрография, вып. 23. – С-Пб.: МО РФ, 2006. С. 17–26.
6. Кондрашихин В. Т. Определение места судна. – М.: Транспорт, 1989. – 230 с.

УЧРЕЖДЕНИЕ: Московская государственная академия водного транспорта (МГАВТ)

ТЕМА: Обоснование методики расчета параметров обратного фильтра в основании судоходного шлюза с конструктивными элементами, выполненными из нетканых геосинтетических материалов

АВТОРЫ: В.П. МЕНТЮКОВ, профессор, доктор технических наук; В.В. ПИСЬМЕНСКИЙ, аспирант

Посвящается памяти Владимира Петровича Ментюкова – прекрасного ученого, научного руководителя и замечательного человека, ушедшего из жизни 8 августа 2010 года…

В мировой практике строительства и реконструкции гидротехнических объектов с каждым годом увеличивается доля конструкций, в которых используются геосинтетические материалы. Применение таких материалов в дорожном, подземном, гидротехническом строительстве, а также при организации мест складирования отвалов, планировке территории, возведении тоннелей, мостов, дренажных устройств позволяет не только сократить сроки и уменьшить материалоемкость, снизив стоимость, но и повысить эксплуатационную надежность сооружений.

В настоящее время геосинтетические материалы (в том числе нетканые – НСМ) широко применяются в портовом гидротехническом строительстве. Их использование направлено на улучшение характеристик работы различных конструктивных элементов сооружений, повышение надежности объектов в эксплуатации.

Одной из основных функций НСМ является армирование слабого основания, его противофильтрационная защита, что повышает несущую способность элементов конструкции и всего сооружения в целом.

Исследованиями установлено, что устройство в конструкции обратного фильтра судоходного шлюза одного слоя с использованием НСМ заменяет отсыпку из крупносортированного песка толщиной слоя не менее 20-30 см. При этом предотвращается разрыхление, эрозия и всплытие мелких частиц грунта слабого основания и нарушение целостности конструкции обратного фильтра.

Известно, что большинство гидротехнических сооружений ВВП России были построены во второй половине XX века и ранее, и к настоящему времени многие из них нуждаются в капитальном ремонте или реконструкции. Речь, в частности, идет о судоходных шлюзах. Поэтому актуальным является направление, способное повысить надежность сооружения за счет замены дорогостоящих песчаных и гравийных строительных материалов фильтров на конструкции с применением НСМ. Это особенно важно для районов, где наблюдается дефицит строительных материалов надлежащего качества и размеров по фракциям, а их доставка в необходимом количестве представляется весьма трудной и затратной.

При расчете параметров обратного фильтра отдельного внимания требует задача установления параметров фильтрации. От правильности ее решения зависят конструктивные параметры, прочность и устойчивость сооружения в целом в период эксплуатации.

В настоящее время для защиты слабых связных и несвязных грунтов, подверженных суффозии, в результате воздействия на них фильтрационного потока в основании гидротехнического сооружения и турбулентного гидравлического режима в камере шлюза (особенно для камеры в виде отдельно стоящих стен с водопроницаемым днищем) выполняются обратные фильтры, характеристики и параметры которых определяются на основании действующих норм и правил.

Для обратного фильтра преимущественно используют уже имеющиеся карьерные грунты, которые подбирают, исходя из условия обеспечения фильтрационной прочности между слоями грунтов в месте контакта с сооружением.

Нормы рекомендуют различные методики подбора обратного фильтра, основные из которых направлены на защиту связных и несвязных грунтов оснований (с учетом наличия или отсутствия данных о гранулометрическом составе фильтра).

Рекомендуемая нормами методика расчета параметров обратного фильтра для защиты слабого связного основания, когда гранулометрический состав не известен, включает приведенные ниже этапы подбора слоев конструкции фильтра.

Рассмотрим настоящую методику на примере судоходного шлюза на нескальном основании из слабого илистого грунта, с напором на сооружение – 12 м, габаритами камеры шлюза по длине и ширине – 100x15 м, головной системой питания, водопроницаемым днищем с креплением железобетонными плитами.

Согласно методике, предлагаемой обществом «Союзводпроект», и рекомендациям по проектированию П 92-80 ВНИИГ и ВСН 47-71 для предотвращения отслаивания грунта в зоне контакта с фильтром необходимо, чтобы удовлетворялось следующее условие:

$$Д_0^{max} \leq Д_0^{расч.}$$

где $Д_0^{max}$ – максимальный диаметр фильтрационных пор материала фильтровой подготовки.

Содержание в грунте основания пылевых частиц крупностью $d < 0{,}005$ м составляет 30%.

Из условия недопущения отрыва или отслаивания агрегатов частиц связного (илистого) грунта основания при контакте с фильтровой подготовкой величина $Д_0^{расч.}$ (расчетный диаметр фильтрационных пор) определяется по формуле:

$$Д_o^{расч.} = \sqrt{\frac{0,34}{I_p + 1}} \le 0,583 \text{ см}, \quad (1)$$

где I_p=1,2 – градиент напора фильтрационного потока в основании.

Подставляя значение [I_p=1,2] в формулу (1), получаем:

$$Д_o^{расч.} = \sqrt{\frac{0,34}{1,2+1}} = 0,41 \le 0,583 \text{ см}.$$

Расчетный диаметр фильтрационных пор:

$$Д_0^{max} \le Д_0^{расч.} \le 4,1 \text{ мм}. \quad (2)$$

В качестве фильтровой подготовки принимается крупнозернистый песок с коэффициентом разнозернистости $\eta_ф$=20.

Значение коэффициента пористости определяется по формуле:

$$\eta_ф = n_0 - 0,1 \lg \eta_ф. \quad (3)$$

Подставляем значения величин и получаем:

$$\eta_ф = 0,4 - 0,1 \lg 20 = 0,27, \quad (4)$$

где n_0 = 0,4 для крупнозернистых песков.

Далее определяется диаметр фракций Д17 расчетного состава грунта 1-го слоя фильтра:

$$Д_{17} = \frac{Д_o^{расч.}}{\chi C}\frac{1-\eta_ф}{\eta_ф} = \frac{4,1}{2*0,75}\frac{1-0,27}{0,27} = 7,37 \text{ мм}, \quad (5)$$

где $C = 0,455\sqrt[6]{\eta_ф} = 0,455\sqrt[6]{20} = 0,75$.

Коэффициент неравномерности раскладки грунта равен:

$$X = 1 + 0,05\eta_ф = 1+0,05*20 = 2. \quad (6)$$

Действующий диаметр фракций 1-го (рис. 1) слоя фильтра $Д_{10}$ определяется по формуле:

$$Д_{10}=i \times Д_{17}= 0,64 \times 7,37= 4,7 \text{ мм}. \quad (7)$$

Коэффициент i=0,64 определяется по зависимости i=f(η) для $\eta_ф$=20.

Вычислим контролирующий диаметр фракций $Д_{60}$:

$$Д_{60}=\eta_ф \times Д_{10}= 20 \times 4,7= 94 \text{ мм}. \quad (8)$$

Максимальный диаметр фракций $Д_{100}$:

$$Д_{100}=Д_{10}+10^x Д_{60}\frac{\eta_ф-1}{5\eta_ф} = 4,7+10^{2,67}*94*\frac{20-1}{5*20^2} \approx 422 \text{ мм}, \quad (9)$$

$$X = 1+1,28 \lg\eta_ф =1+1,281 \lg 20 = 2,67.$$

По полученным данным строится график гранулометрического состава, на основании которого определяется толщина 1-го слоя фильтровой подготовки из крупнозернистого песка (t_{min}=250 мм).

Затем подбирается 2-й слой обратного фильтра – из щебеночного грунта (t_{min}=300 мм).

Учитывая разнородность грунтов основания и обратного фильтра, определяются максимальный, минимальный и осредненный коэффициенты фильтрации по формулам (10), (11), (12) соответственно.

$$K_{ср} = \sqrt{K_{макс} * K_{мин}} = \sqrt{0,001*0,00003} = 0,0002 \text{ м/с}, \quad (12)$$

где $K_щ$ = 0,002 м/с, $T_щ$ = 0,3 м – коэффициент фильтрации и толщина слоя щебенистого грунта; $K_{кзп}$ = 0,00173 м/с, $T_{кзп}$ = 0,25 м – коэффициент фильтрации и толщина слоя крупнозернистого песка; $K_{ил}$ = 0,000023 м/с, $T_{ил}$ = 0,25 м – коэффициент фильтрации грунта основания и толщина слоя илистого грунта; $K_{макс}$, $K_{мин}$, $K_{ср}$ – максимальный, минимальный и осредненный коэффициенты фильтрации соответственно.

Фильтрационный расход через основание сооружения и слои обратного фильтра определяется по формуле:

$$q_{пмм} = KсрT\frac{H}{nB} = 0,0002*1,55*\frac{12}{1,87*1} = 0,002 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (13)$$

где $K_{ср}$ – осредненный коэффициент фильтрации, м/с; $T_{пол}$ – полная глубина водопроницаемого основания (в том числе слои обратного фильтра), м; H – напор, м; B – ширина фильтровой подготовки, м; n – поправочный коэффициент.

Для расчетов параметров обратного фильтра с конструктивными элементами, выполненными из нетканых синтетических материалов, авторами предложена уточненная методика расчета, позволяющая достаточно полно и обосновано подобрать эффективные размеры слоев фильтра с учетом толщины и фильтрационных свойств применяемого НСМ.

На основании выполненных расчетов рассмотрим вариант методики подбора параметров обратного фильтра, в конструкции которого применим НСМ «Бидим» толщиной 1,7 мм, уменьшим слой крупнозернистого песка до 10 см, а слой щебеночного грунта – до 20 см (см. рис. 1).

В предлагаемой авторами конструкции обратного фильтра рекомендуется нетканый синтетический материал «Бидим», поскольку он обладает высокой прочностью на истирание, в частности при работе под креплением из железобетонных плит.

$$K_{макс} = \frac{(K_щ T_щ + K_{кзп} T_{кзп} + K_{ил} T_{ил})}{(T_щ + T_{кзп} + T_{ил})} = \frac{(0,002*0,3+0,00173*025+0,000023*1)}{(0,3+0,25+1)} = 0,001 \text{ м/с}$$

Формула 10

$$K_{мин} = \frac{(T_щ + T_{кзп} + T_{ил})}{(T_щ / K_щ + T_{кзп} / K_{кзп} + T_{ил} / K_{ил})} = \frac{(0,3+0,25+1)}{(0,3/0,002+0,25/0,00173+1/0,000023)} = 0,00003 \text{ м/с}$$

Формула 11

Эффективный диаметр пор НСМ составляет до 100 мкм, что позволяет обратному фильтру пропускать расчетный фильтрационный расход и не допускать явления кальмотации.

Определим максимальный, минимальный и осредненный коэффициенты фильтрации по формулам (14), (15), (12):

$$K_{ср} = \sqrt{K_{макс} * K_{мин}} = \sqrt{0{,}001 * 0{,}00003} = 0{,}0002 \text{ м/с}, \quad (12)$$

где $K_щ$ = 0,002 м/с, $T_щ$ = 0,3 м – коэффициент фильтрации и толщина слоя щебенистого грунта; $K_{нсм}$ = 0,00123 м/с, $T_{нсм}$ = 0,25 м – коэффициент фильтрации и толщина слоя крупнозернистого песка; $K_{кзп}$ = 0,00173 м/с, $T_{кзп}$ = 0,0017 м – коэффициент фильтрации и толщина слоя НСМ «Бидим»; $K_{ил}$=0,000023 м/с, $T_{ил}$=0,25 м – коэффициент фильтрации грунта основания и толщина слоя илистого грунта; $K_{макс}$, $K_{мин}$, $K_{ср}$ – максимальный, минимальный и осредненный коэффициенты фильтрации соответственно.

Фильтрационный расход через основание сооружения и конструкцию обратного фильтра:

$$q_{пмм} = KсрT\frac{H}{nB} = 0{,}0002 * 1{,}3 * \frac{12}{1{,}87 * 1} = 0{,}002 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (13)$$

Коэффициент «К» – коэффициент соотношения фильтрационных расходов при выполнении фильтра из минеральных материалов и при выполнении фильтров с применением НСМ:

$$K = q_{пмм}/q_{нсм} = 0{,}002/0{,}002 = 1. \quad (16)$$

Далее выполним проверку на размыв первого слоя обратного фильтра толщиной 10 см из крупнозернистого песка по допустимым неразмывающим скоростям, при этом должно выполняться следующее условие:

$$V_{пр.доп.} \le k_ф \frac{H}{l} \text{ м/с}, \quad (17)$$

где $V_{пр.доп.}$ – допустимая неразмывающая скорость для крупнозернистых песков (м/с); $k_ф$ = 0,00173 м/с – коэффициент фильтрации 1-го слоя обратного фильтра; l = 10 см – толщина 1-го слоя обратного фильтра из крупнозернистого песка.

В результате получаем V = 0, 00173*12/0,1 = 0,21 м/с. Эта скорость намного меньше предельно допустимого значения неразмывающей скорости, равной для крупнозернистых песков 3 м/с.

Сравнивая результаты, полученные по двум вариантам методики, следует отметить, что при выполнении конструкции фильтра с применением НСМ фильтрационный расход, проходящий через основание сооружения, одинаков. Таким образом, анализируя и применяя различные типы НСМ в конструкции обратного фильтра судоходного шлюза можно, применив предлагаемую методику подбора обратных фильтров, осуществлять с учетом значения расходов фильтрации выбор и назначение эффективных параметров фильтров с целью повышения надежности конструкции при эксплуатации таких сооружений.

При применении НСМ в конструкции происходит снижение суммарного давления от фильтра на основание, а объем песчано-щебеночных материалов фильтра сокращается с 0,55 до 0,30 м^3 на 1 м^2.

В качестве обоснования методики подбора параметров обратного фильтра, в итоге, построен график (рис. 2), на котором отображены 4 кривые линии. Каждая из них отображает толщину обратного фильтра при конкретном расчетном случае. И только зеленая линия на графике, построенная по предложенной методике, дает результат, идентичный исходному, – фиолетовая линия на графике.

ВЫВОДЫ:

1. На основании исследований предложена методика расчета параметров обратного фильтра в основании судоходных шлюзов с конструктивными элементами из нетканых синтетических материалов (НСМ).

2. Значения фильтрационных расходов устанавливаются подбором в пределах расчетных параметров обратного фильтра для конкретного сооружения, что обеспечивает надежную работу всей конструкции.

3. Применение в конструкции обратного фильтра судоходных шлюзов НСМ позволяет снизить объемы песчано-щебеночных материалов примерно на 40%.

4. Уменьшение объемов дорогостоящих материалов и производства работ ведет к снижению общей трудоемкости и стоимости работ.

5. Сокращение объемов применяемых материалов обратного фильтра обусловливает уменьшения веса и, как результат, – уменьшение давления на слабое основание сооружения. Также стоит отметить улучшение качества работ и повышение эксплуатационной надежности сооружения.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. В.П. Ментюков. Технические и технологические решения по восстановлению обратных фильтров при реконструкции днищ камер Пермского шлюза. Международный журнал речников. Речной транспорт. № 1 (31) 2008 г. С. 56-57.

2. В.П. Ментюков. Технологические решения по устройству геосинтетического фильтра для крепления морского дна при реконструкции причала в Калининградской области. Сборник трудов научно-практической конференции секции

$$K_{макс} = \frac{(K_щ T_щ + K_{нсм} T_{нсм} + K_{кэп} T_{кэп} + K_{ил} T_{ил})}{(T_щ + T_{нсм} + T_{кэп} + T_{ил})} =$$

$$= \frac{(0{,}002 * 0{,}2 + 0{,}00123 * 0{,}0034 + 0{,}00173 * 0{,}1 + 0{,}000023 * 1)}{(0{,}2 + 0{,}0034 + 0{,}1 + 1)} = 0{,}001 \text{ м/с}$$

Формула 14

$$K_{мин} = \frac{(T_щ + T_{нсм} + T_{кзп} + T_{ил})}{(T_щ / K_щ + T_{нсм} / K_{нсм} + T_{кзп} / K_{кзп} + T_{ил} / K_{ил})} =$$

$$= \frac{(0{,}2 + 0{,}0031 + 0{,}1 + 1)}{(0{,}2 / 0{,}002 + 0{,}0034 / 0{,}00123 + 0{,}1 / 0{,}00173 + 1/0{,}000026)} = 0{,}00003 \text{ м/с}$$

Формула 15

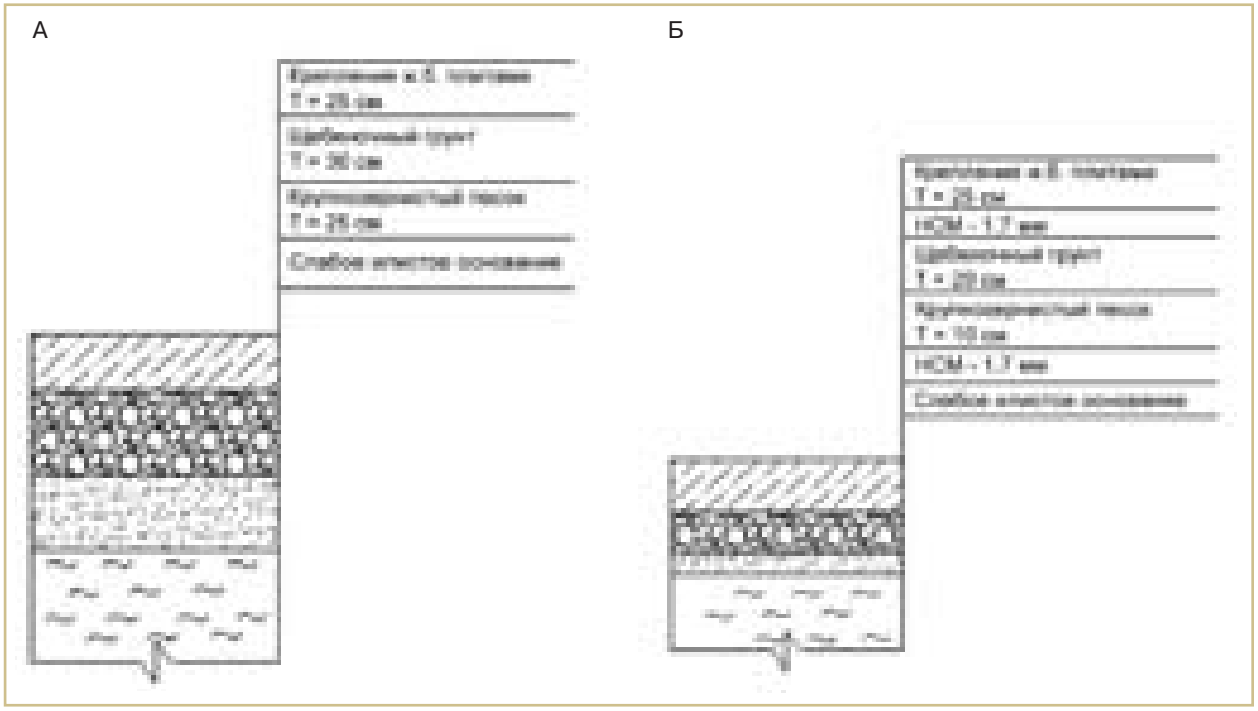
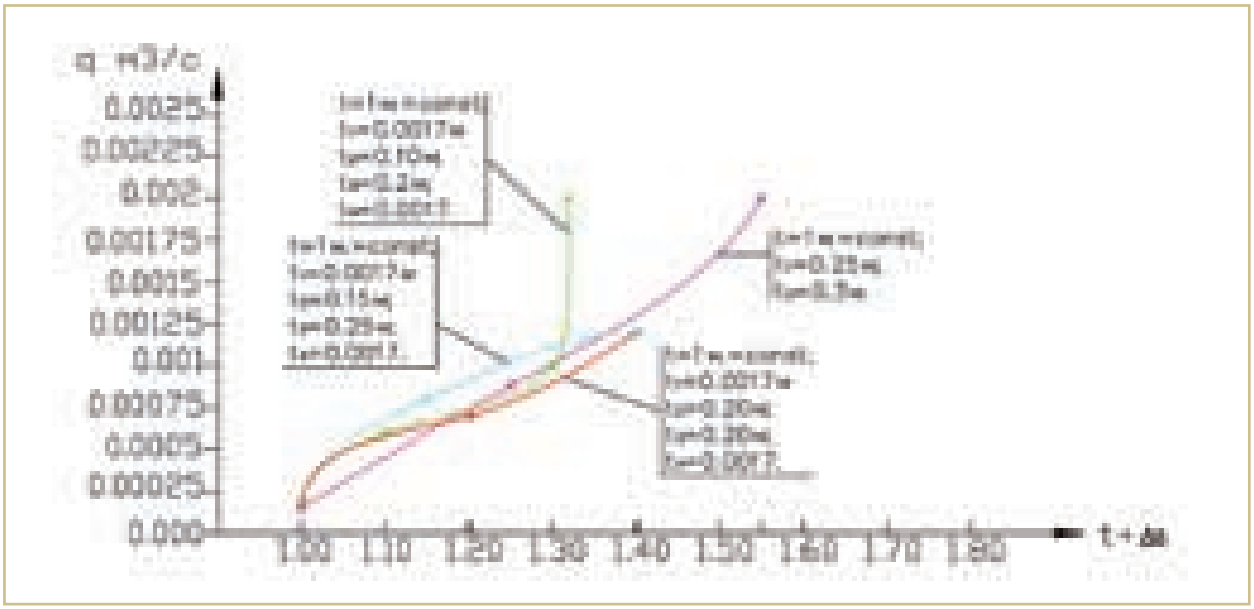


Рис. 1. Конструкции обратных фильтров: А (типовое решение) – вариант 1 – природные минеральные материалы; Б(рекомендуемое решение) – вариант 2 – с применением нетканых синтетических материалов

«Водные пути и порты», МГАВТ, изд-во «Альтаир», Москва, 2005 г.
3. В.П. Ментюков. Рекомендации по применению геосинтетического фильтра для укрепления морского дна в районе водосбросного оголовка ZN.Y.АЭС «Бушер» в Иране. Союзморниипроект, Москва, 1999 г.
4. В.В. Письменский. Основные предпосылки к разработке методики расчета параметров обратного фильтра в основании судоходного шлюза с конструктивными элементами, выполненными из нетканых геосинтетических материалов. Сборник трудов научно-практической конференции секции «Водные пути и порты», МГАВТ, изд-во «Альтаир», Москва, 2009 г.
5. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции по применению синтетических текстильных материалов при строительстве земляного полотна автомобильных дорог. Под редакцией В.Д. Казарновского, изд-во Союздорнии, Москва 1980 г.
6. Рекомендации по проектированию П92-80/ВНИИГ; ВСН 47-71/ Минэнерго СССР.

Рис. 2. График зависимости фильтрационного расхода от толщины слоев обратного фильтра



УЧРЕЖДЕНИЕ: Новосибирская государственная академия водного транспорта (НГАВТ)

ТЕМА: Пространственно-спектральный подход в информационном обосновании требований к изыскательским работам на ВВП

АВТОРЫ: С.В.МОТОРИН, доктор технических наук, старший научный сотрудник; Н.В.ГОЛЫШЕВ, доктор технических наук, профессор; А.В. БОТВИНКОВ, аспирант; А.А. ТЮМЕНЦЕВ, аспирант; А.Р. АБДРАШЕВ, инженер

Для обеспечения безопасности судоходства требуется осуществлять контроль за состоянием внутренних водных путей (ВВП).

Значительно ускорить процесс кодирования навигационно-гидрографических данных призвано Постановление Правительства РФ от 25.08.2008 № 641, предписывающее обязательное оснащение всех судов РФ системами позиционирования ГЛОНАСС/GPS. Однако, несмотря на хорошую изученность судоходной обстановки, по причине изменчивости русловых процессов все равно необходимо проводить постоянный мониторинг глубин с целью корректировки речных карт и навигационных пособий. В связи с этим актуальным направлением работы является методическое информационное обоснование требований для изысканий на ВВП, позволяющих при помощи современных IT-технологий с заданной точностью учитывать рельеф дна [2].

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗЫСКАНИЙ НА ВВП

Реки представляют собой «живую» и динамичную систему, характеризующуюся быстрым изменением рельефа дна под воздействием потока. Для исследования динамики флювиального рельефа и решения ряда практических задач необходимо знать строение речного русла, контролировать и учитывать непостоянство его параметров путем повторного проведения промеров – мониторинга природного процесса.

Однако стоимость промеров глубин остается достаточно высокой, поэтому съемки дна проводятся по мере практической необходимости. Их применение для оперативного мониторинга природного процесса ограничено.

Способы промера глубин на акваториях производятся в соответствии с едиными для всех внутренних водоемов нормами [3-6]: ГКИНП 11-152-85, РСН 73-88, РД 31.74.04-2002.

РД 31.74.04-2002 обусловливает минимальное количество точек на промерном галсе и пикет в зависимости от сложности рельефа (таблица), а требования в основном соотносятся с масштабом построения изобат.

ГКИНП-11-152-85, РСН 73-88 и РД 31.74.04-2002 дают общие рекомендации по расстоянию, через которое необходимо производить промер глубины рек (П.3.17-3-П.3.18), изображению изобат на плане (П.3.19) и точности отсчетов (П.3.20).

Инструкция по созданию топографических карт шельфа и внутренних водоемов ГКИНП-11-152-85: (П.1.14.4) определяет требования к сгущению съемочных галсов в процессе съемки на участках со сложным рельефом.

Однако нормы проведения изыскательских работ не выделяют понятия «сложного» и «плавного» рельефа, а также не определяют обоснований точности, с которой необходимо производить замеры глубины рек при проведении путевых работ.

На реальных объектах обстановка русла реки изменчива. Поэтому для каждого отдельного участка реки целесообразно устанавливать свои нормы и давать рекомендации по оперативности и точности проведения измерительных работ с целью сокращения времени и затрат средств на их реализацию.

СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗЫСКАНИЙ НА ВВП

До недавнего времени промер глубины рек производился масштабными экспедициями, полевой сезон которых продолжался длительное время. Последние достижения техники, и прежде всего внедрение методов спутникового позиционирования (GPS и ГЛОНАСС), существенно повысили точность и оперативность полевых измерений.

Разработаны и созданы малогабаритные программно-аппаратные промерные комплексы, используемые при измерении глубин на крупных реках. Позиционирование ведется в автономном режиме с метровой точностью (4-15 м). В перспективе можно использовать дифференциальный режим, что позволит повысить точность промерных работ до дециметров. Вместе с этим оценить, насколько одни технологии совершеннее других на современном этапе сложно. На практике судно, проводящее промеры, не может двигаться прямолинейно, его качает на волнах, сносит течением, и его траектория может выглядеть, как на рис. 1 [7].

Частота галсов с учетом сложности рельефа

Вид промера	Расстояния между галсами, м					
	Масштабы оформления планов					
	1:500	1:1000	1:2000	1:5000	1:10000	1:25000
Рекогносцировочный	-	-	-	250	500	1000
Облегченный	-	-	40-80	100-200	200-400	-
Подробный	-	-	20-40	50-I00	100-200	-
Специальный	5-10	10-20	-	-	-	-

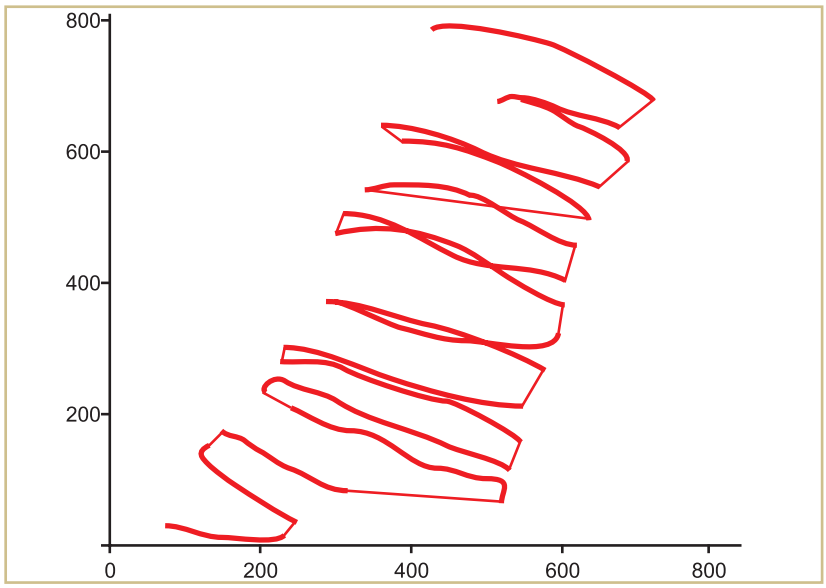


Рис. 1. Траектория движения при промерах

В результате получить точный поперечный срез профиля практически невозможно. Для обнаружения мелей особенно важно расстояние, через которое производятся измерения, а оно (при известных характеристиках эхолота и системы спутниковой навигации) зависит от скорости движения судна.

Возникает вопрос: насколько погрешность позиционирования, основанная на данных, получаемых от GPS-модулей и эхолотов, согласована со скоростью движения катера [8], т.е. соответствуют ли данные, собранные при движении на большой скорости, реальной обстановке? Например, если судно будет двигаться со скоростью 36 км/ч, то за каждую секунду оно будет преодолевать 10 м и соответственно возникает возможность пропустить крутую впадину или мель (данные с GPS по протоколу NMEA поступают 1 раз в 2 с). Если же двигаться слишком медленно, тогда на проведение изыскательских работ будет затрачено очень много времени.

На современном этапе при проведении промеров происходит постоянное накопление массива данных. И для того, чтобы повысить оперативность получаемых карт рельефа дна или подробность плана без потери качества самой карты, а также сократить затраты, возможно обрабатывать данные, полученные раньше.

IT-технологии позволяют разработать новые подходы по обоснованию требований к методике изысканий на ВВП, учитывающие особенности рельефа дна. Расстояние между промерами должно удовлетворять заданной точности для каждого участка реки, при этом скорость движения судна в разных зонах может меняться.

ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ПОДХОДА ПРИ ИЗЫСКАНИЯХ НА ВВП

Если рассматривать данные промера как совокупность мгновенных значений u(t) сигнала, полученных в определенные моменты времени t_i (i=1,2, …, N), то его результаты будут определяться совокупностью отсчетов. Отрезок времени $\Delta t_i = t_i - t_i - 1$ между соседними отсчетами будем считать шагом дискретизации.

В общем случае представление непрерывного сигнала промера русла реки u(t) на интервале T может быть записано в виде:

$$A[u(t)] = A[u(c_1, c_2, \ldots, c_n)],$$

где A – оператор дискретного представления сигнала; $c_1, c_2, \ldots, c_n$ – совокупность отсчетов.

Аналогичным образом можно описать и операцию восстановления совокупностью координат непрерывной функции $u'(t)=B[(c_1, c_2, \ldots, c_n)]$ (воспроизводящей функции), отображающей сигнал с некоторой погрешностью приближения $\varepsilon = u(t) - u'(t)$, где B – оператор восстановления, реализуемый устройством восстановления сигнала.

Таким образом, задача в математическом плане сводится к выбору пары A и B, обеспечивающей заданную точность восстановления сигнала. При одном и том же операторе представления A для восстановления могут использоваться различные операторы B.

Поскольку исходными данными в настоящей работе являются результаты промерных работ прошлых лет, то вопрос отыскания A не ставится, а необходимо лишь подобрать к нему такой оператор B, который обеспечивал бы необходимую точность восстановления сигнала.

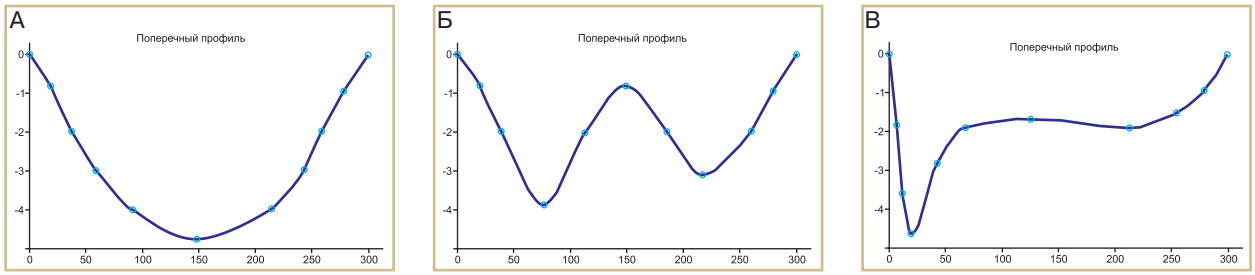
Воспроизводящая функция представляется аппроксимирующим полиномом. Для определения координат сигнала используется соотношение:

$$u'(t) = \sum_{i=0}^{N} c_i \varphi_i(t) = B(c_0, c_1, \ldots, c_n),$$

где $\{\phi_i(t)\}$ – система базисных функций.

Из теории сигналов известно, что для восстановления некоторого сигнала (в данном случае – траектория движения катера (см. рис. 1), галсы-профили) необходимо удовлетворение требованиям теоремы Котельникова [7]: для восстановлении аналогового сигнала с ограниченным спектром без потерь по своим дискретным отсчетам часто-

Рис. 2. Типы профилей: А – пологое ложе; Б – ложе с перекатом; В – ложе с деформацией (левое)



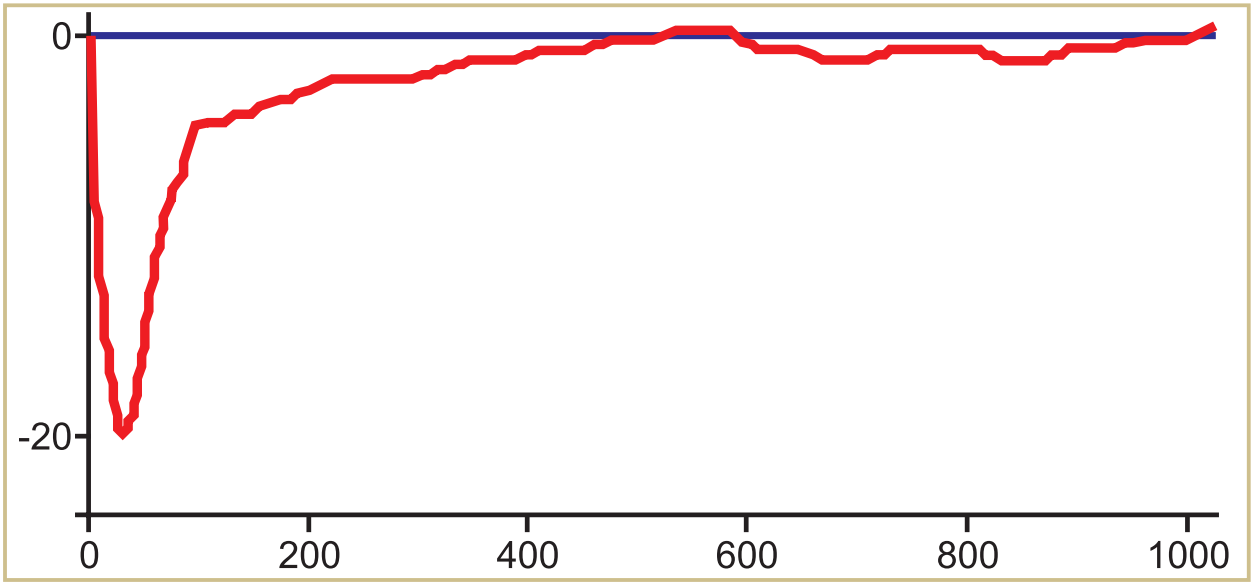


Рис. 3. Исследуемый профиль

та взятия отсчетов должна быть более удвоенной максимальной частоты спектра (F_{max} – в данном случае пространственная частота).

Подобная трактовка рассматривает идеальный случай, когда сигнал начался бесконечно давно и никогда не закончится, а также не имеет точек разрыва во временной характеристике. Разумеется, реальные сигналы не обладают такими свойствами, так как они конечны по времени и обычно их спектр бесконечен. В таком варианте полное восстановление сигнала невозможно.

Однако авторами не ставится задача полного восстановления сигнала, а лишь предпринимается попытка разобраться, насколько имеющиеся в СНИПах и ГОСТах методики соответствуют требованиям современных информационных технологий и возможно ли расширить их рамки.

На основе этого принципа нет необходимости определять значение F_{max}, достаточно с помощью ряда Котельникова вычислить погрешность восстановления $\varepsilon=u(t)-u'(t)=max$ при определенном шаге дискретизации на интервале. В качестве критериев ε_{max} будут использоваться требования РСН 73-88 (П.3.19.).

В рамках данной работы было проведено компьютерное моделирование для определения максимальной абсолютной погрешности восстановления профиля русла реки (при разной частоте дискретизации):

$$\varepsilon_{max}=Pogr_{дискр.}=max(Pogr_{дискр.}-Pogr_{исх.}), \quad (1)$$

где

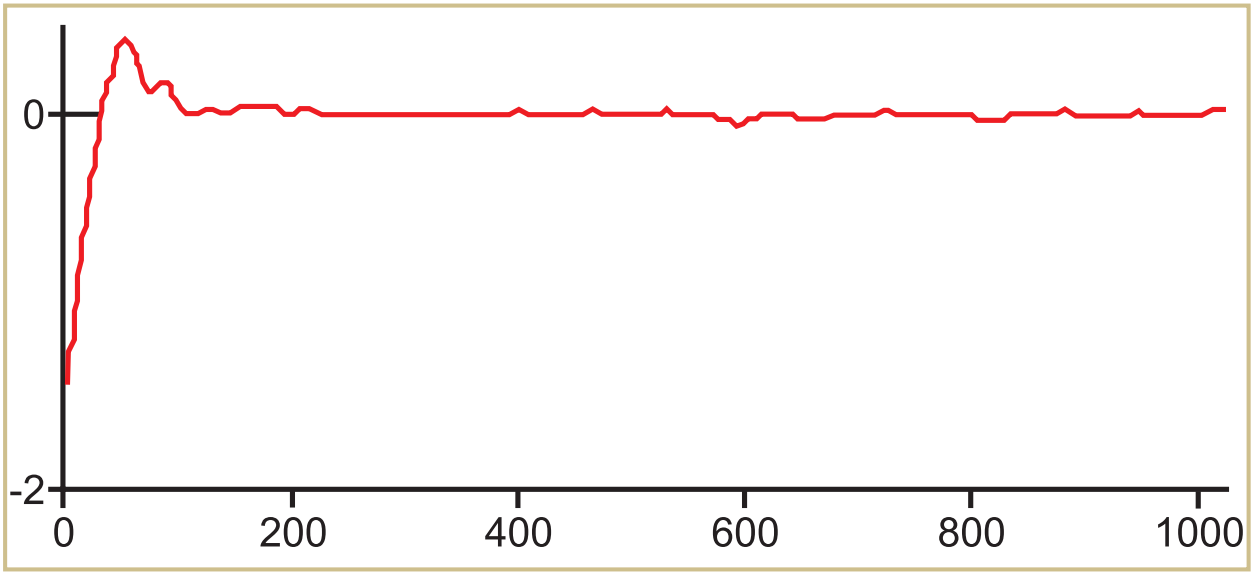
$$Prof_{восст.}=\sum_{n=0}^{N}A_{изм}(n)\cdot sinc\left[(\pi/step)\cdot(x-n\cdot step)\right] -$$

значения профиля, восстановленного рядом Котельникова; $Prof_{исх.}$ – величины исходного профиля, полученные с минимальным интервалом дискретизации (в соответствии с РСН 73-88).

В качестве исследуемого $Prof_{исх.}$ обычно рассматриваются 3 типа профилей (рис. 2).

Стоит отметить, что наиболее важным параметром является крутизна спада/подъема дна реки, которая по нормативам не может превышать более 1 м/м, поэтому в работе был рассмотрен профиль, приведенный на рис. 3. Он в совокупности представляет все возможные варианты поперечного среза русла реки. С целью

Рис. 4. Скорость изменения профиля



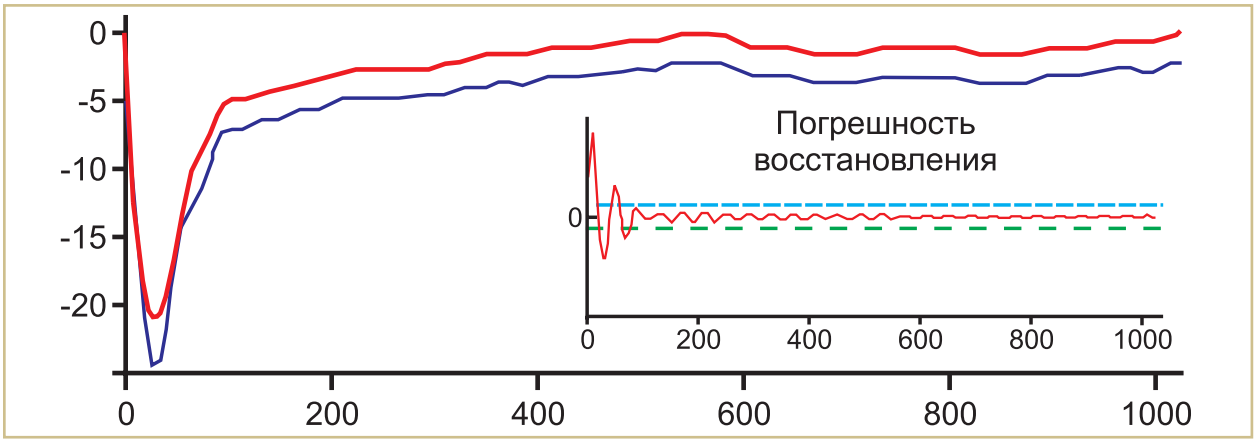
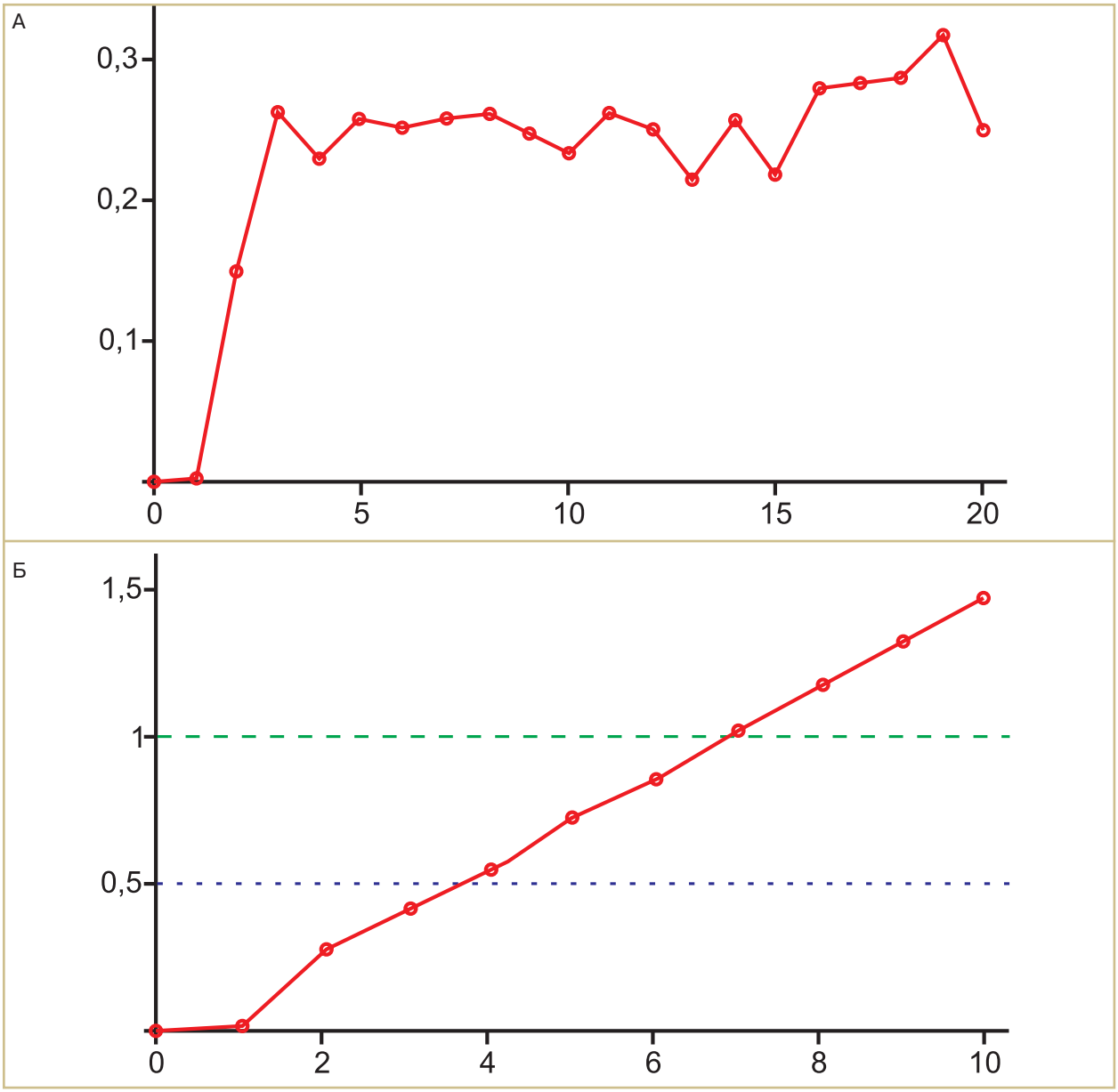


Рис. 5. Результаты восстановления профиля русла и график изменения погрешности восстановления

Рис. 6. График погрешности восстановления от шага дискретизации на участке: А – 150-1024 м; Б – 0-150 м



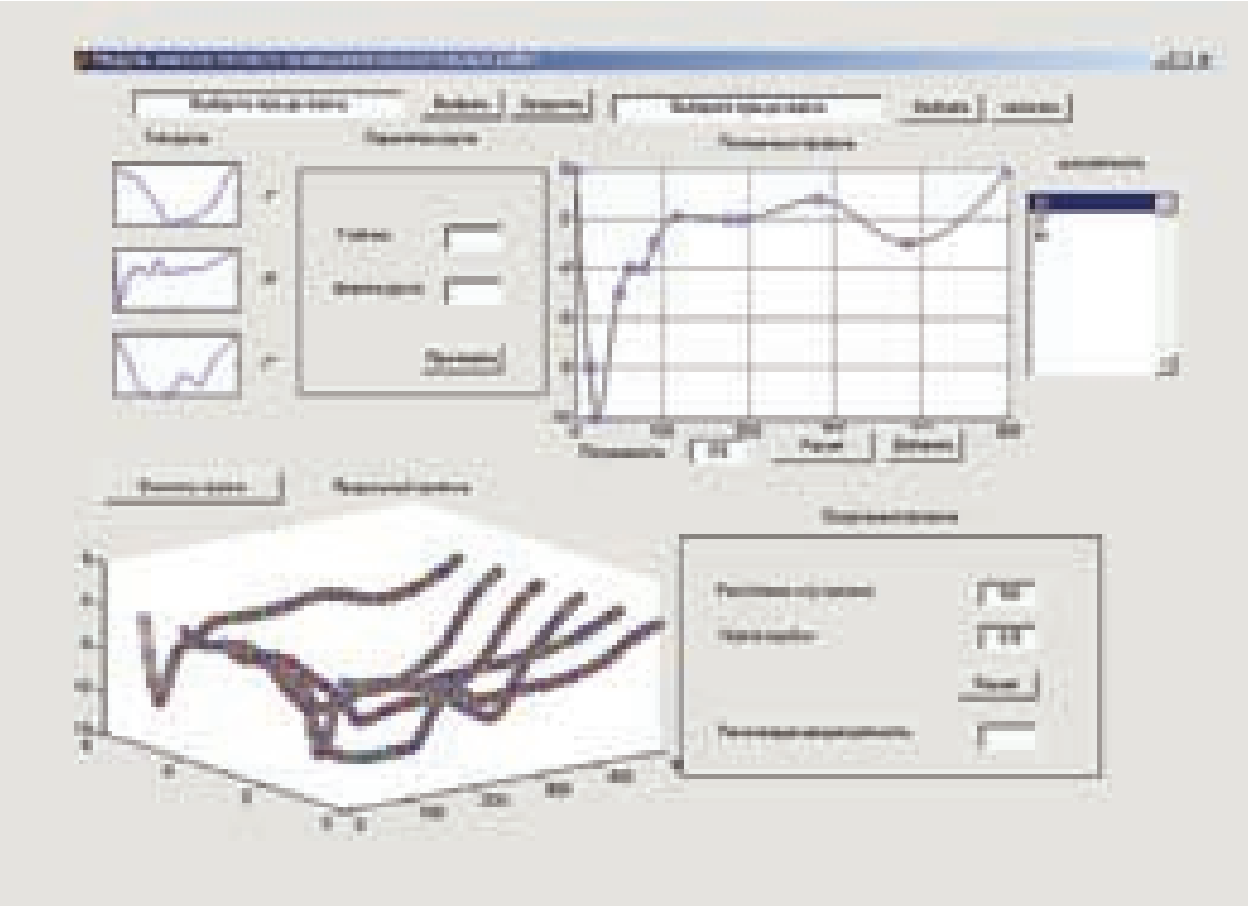


Рис. 7. Интерфейс пользователя авторской системы

устранения резких изломов (на практике их не бывает) и применения ограничений на скорость изменения профиля (не более 1 м/м), исследуемый вариант был получен путем использования кубической сплайн-интерполяции по результатам дискретных значений профиля (частота дискретизации 10-20 $м^{-1}$). Путем поиска первой производной эта кривая исследовалась на скорость изменения (рис. 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 5 приведены исходный и восстановленный профили, соответственно верхняя и нижняя кривая (при интервале дискретизации 20 м и ширине профиля русла 1024 м). Отчетливо видно их совпадение. Здесь же приведена и зависимость изменения абсолютной погрешности при восстановлении, из которой понятно, что, начиная со 100 м, она входит в допуск $\pm 0{,}5$ м (максимальное значение < 4 м).

На рис. 6А показана зависимость абсолютной погрешности восстановления от шага дискретизации на участке 150-1024 м в диапазоне его изменения 0-20 м.

На рис.6Б отображена зависимость абсолютной погрешности восстановления от шага дискретизации на участке 0-150 м в диапазоне 0-10 м. Видно, что, несмотря на изменение шага дискретизации до 10 м, на практике реальное значение не должно превосходить 4 м.

Следует отметить, что в соответствии с рис. 3 изменение значения скорости профиля здесь составляет 1,4 м и превосходит максимально возможную величину.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ПРОЦЕССА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Авторами в среде Matlab был разработан модуль информационной поддержки, интерфейс пользователя которого показан на рис.7.

В программе реализованы следующие возможности:

– создание и редактирование вида поперечного профиля: выбор и изменение формы, глубины русла и ширины ложа (рис. 8);

– установка необходимой максимальной погрешности восстановления, определение характерных участков дискретизации и определение рекомендуемого шага дискретизации (промеров) на этих участках при заданной погрешности (рис. 9);

– создание набора поперечных профилей разной формы с указанием шага между галсами и нормы ошибки, восстановление двумерного русла реки и расчет рекомендуемого шага между галсами (рис. 10).

При создании профилей используется сплайн-интерполяция, для повторного использования созданные профили сохраняются в формате txt.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

– принятые в СНИП, РСН и РД масштабы и расстояния между промерами соответствуют теоретическим предпосылкам на основе пространственно-спектрального подхода;

– учет результатов предыдущих промеров, базы знаний позволяет более гибко подходить к выбору шага дискре-

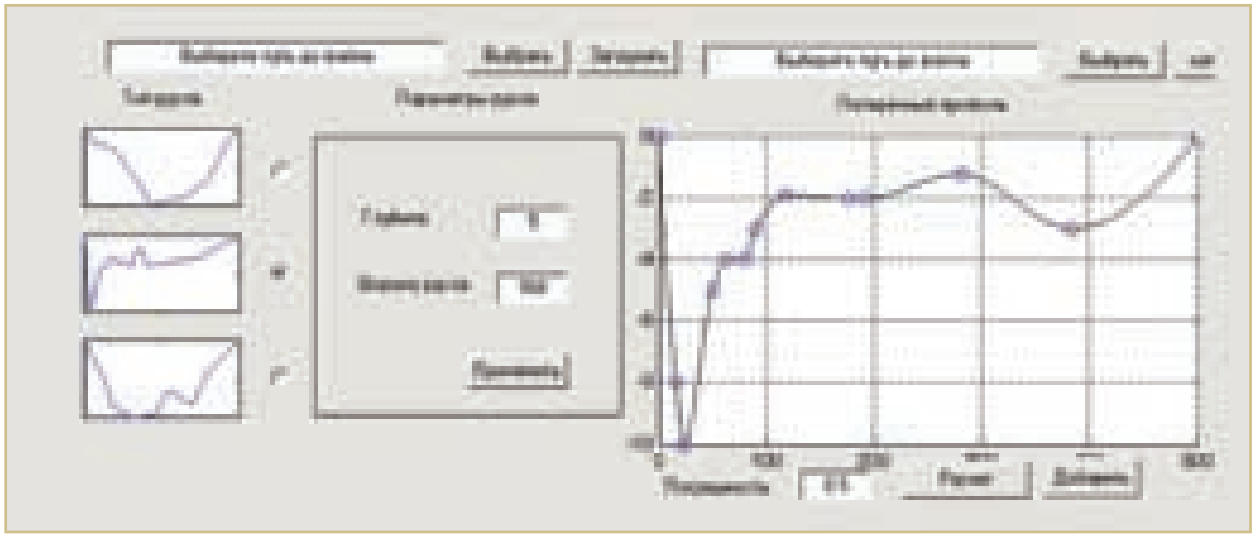


Рис. 8. Выбор рельефного шаблона

тизации с сохранением необходимой точности, строить адаптивные информационные системы [9];

– предложенный подход можно обобщить и для выбора расстояния между галсами;

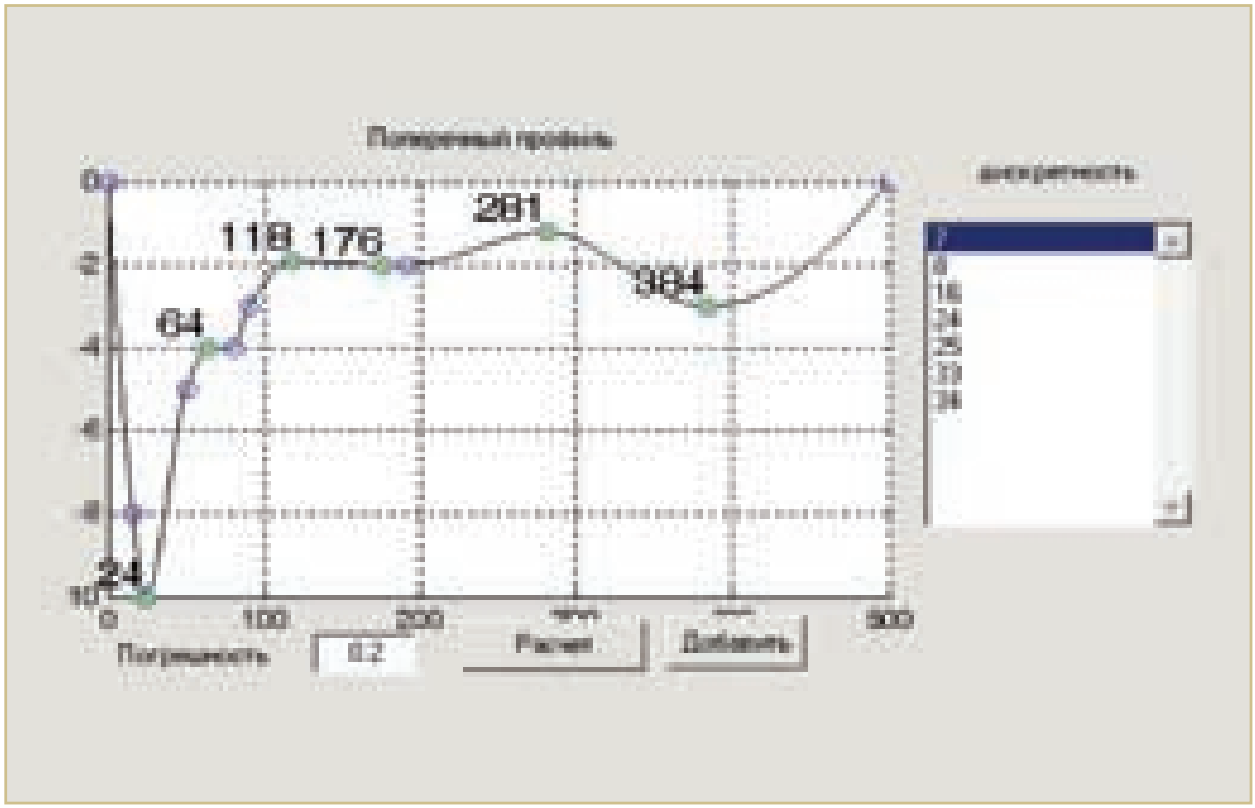
– на основе полученных данных можно создавать модели участков рек и использовать их при компьютерном моделировании русловых процессов.

Таким образом, авторам удалось разработать информационно-методическое обеспечение для проведения изыскательских работ на ВВП и создать основу для учета разнообразных факторов, влияющих на точность и оперативность полученных планов (см. выше), что особенно важно при внедрении современных IT-технологий в процесс обработки данных при изысканиях на ВВП.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учебник [текст] / А.Б. Сергиенко – С-Пб.: Питер, 2002, – 607 с.: ил.
2. Голышев Н.В. Перспективы использования информационных технологий на водном транспорте для предотвращения чрезвычайных ситуаций [текст] // Н.В. Голышев, С.В. Моторин, Д.Н. Голышев. – Сибирский научный вестник. Новосибирск. – 2006. – Вып. 9., С. 287–291.

Рис. 9. Определение шага дискретизации для шаблонного профиля (кривая, проходящая через точки, – исходная); в окне показан рекомендуемый шаг дискретизации, а на профиле цифрами – участки интерполяции с этим шагом



3. Бесплатная библиотека стандартов и нормативов – электронная библиотека [Электронный ресурс] – Электрон. дан. – 2008 – Режим доступа: http://www.doclo-ad.ru, свободный. – Загл. с домашней страницы Интернета. – Корректируется часто. – Яз. рус.
4. РСН 73-88. Инженерные изыскания для строительства [текст] / Госстрой РСФСР. – М.: МосЦТИСИЗ, 1988. – 26 с.
5. ГКИНП 11-152-85. Инструкция по созданию топографических карт шельфа и внутренних водоемов [текст]. – введ. 04.12.1985. – 158 с.
6. РД 31.74.04-2002. Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин [текст]. Введ 17.06.2004 – 176 с.
7. Голышев Н.В. Информационное обеспечение камеральных работ на внутренних водных путях [текст] // Н.В. Голышев, С.В. Моторин. – Сибирский научный вестник. Новосибирск. – 2007. – Вып. 10., С. 436–441.
8. Голышев Н.В. Моделирование процесса изысканий на внутренних водных путях [текст] // Н.В. Голышев, С.В. Моторин, В.М. Ботвинков. – Сибирский научный вестник. Новосибирск. – 2007. – Вып. 10., С. 441–448.
9. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы. Принципы построения [текст] / М.П.Цапенко. М. Энергия, 1974. – 319 с.

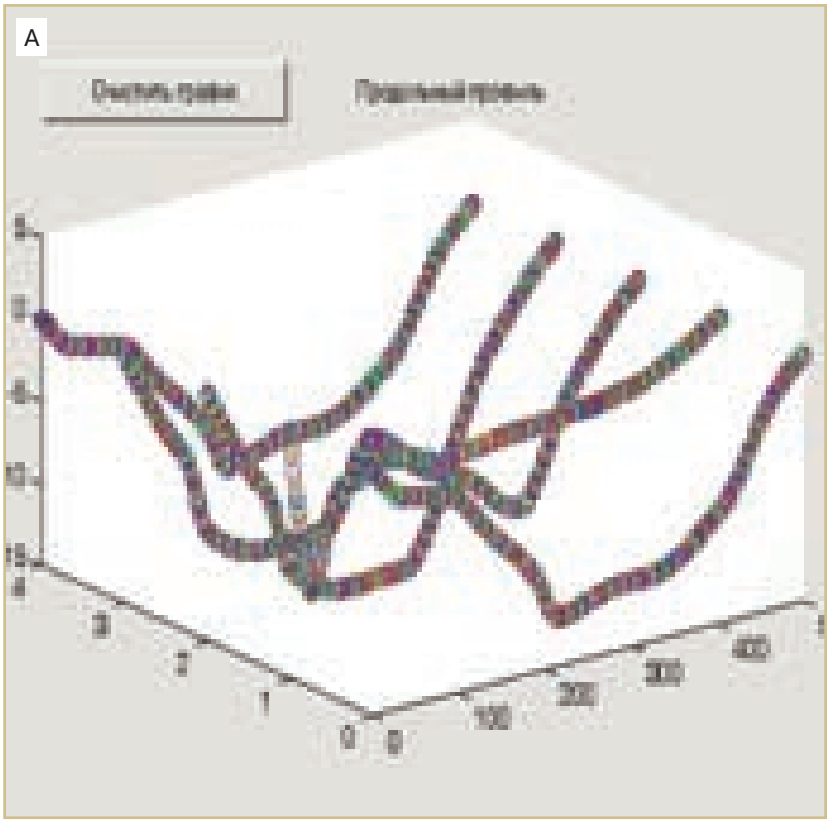
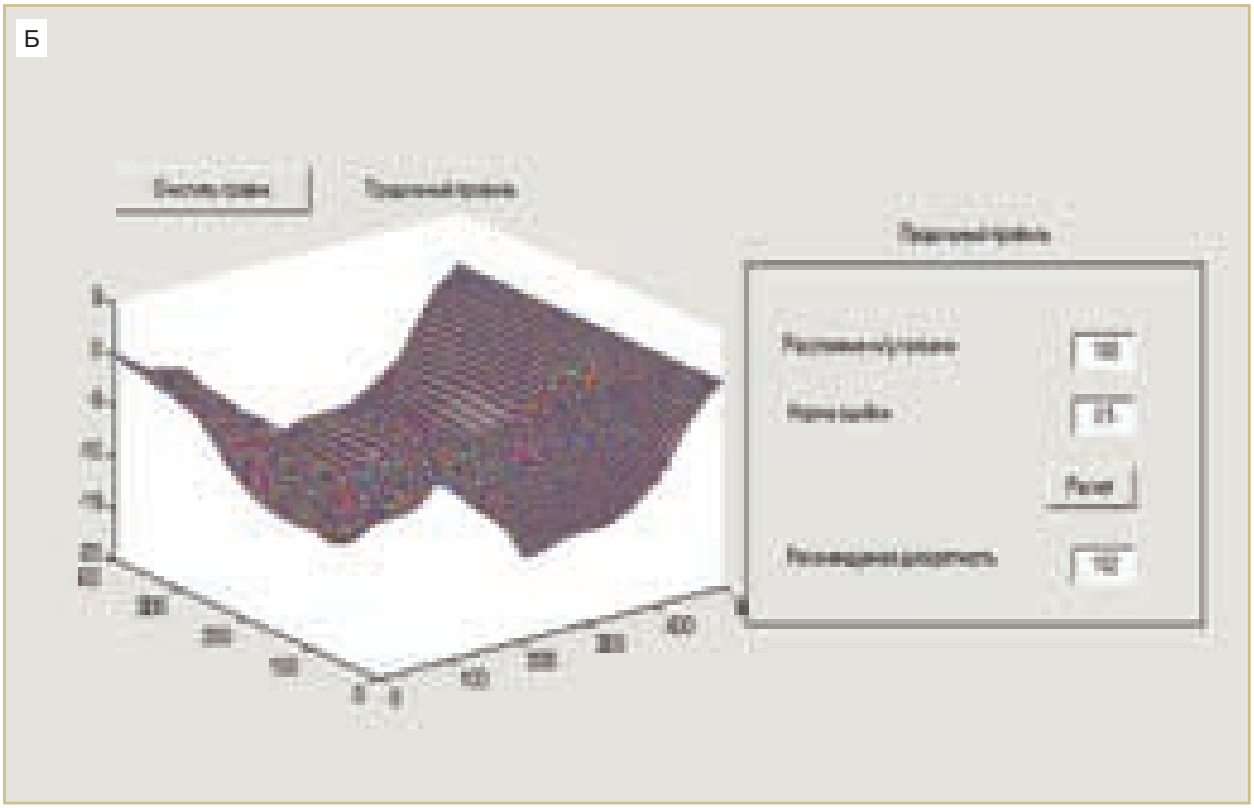


Рис. 10. Создание набора поперечных профилей между галсами (А) и восстановление двумерного построения русла реки (Б), расчет рекомендуемого шага между галсами



УЧРЕЖДЕНИЯ: НИИ энергетических сооружений (НИИ ЭС); Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ)

ТЕМА: Результаты моделирования спрямления русла р. Оби в районе г. Колпашево

АВТОРЫ: В.В. БЕЛИКОВ, д.т.н., начальник отдела численных гидравлических исследований НИИ ЭС; А.С. ЗАВАДСКИЙ, к.г.н., старший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева (НИЛЭПиРП) МГУ; С.Н. РУЛЕВА, к.г.н., старший научный сотрудник НИЛЭПиРП МГУ; Р.С. ЧАЛОВ, д.г.н., профессор кафедры гидрологии суши, заведующий НИЛЭПиРП МГУ

Рис. 1. Переформирования русла р. Оби у г. Колпашево:
1 – положение русла в 1899 г.; 2 – положение русла в 1979 г.;
3 – положение русла в 2009 г.; 4 – смещение вершины Колпашевской излучины за 1899-2009 гг.

Населенные пункты издревле тяготеют к рекам. Являясь источником водоснабжения, рыбных промыслов, удобной, зачастую единственной транспортной артерией, они вместе с тем представляют значительную угрозу для освоенных человеком территорий вследствие происходящих русловых переформирований. Наиболее опасными их проявлениями являются размывы берегов, нередко приводящие к разрушению целых городских кварталов, инженерных коммуникаций, рекреационных зон, активизации склоновых и овражных процессов на подмываемых берегах. Характерным примером подобного негативного воздействия реки на городскую инфраструктуру на протяжении всего XX века является г. Колпашево, расположенный на правом берегу р. Оби в ее среднем течении.

Город Колпашево, возникший как поселение в XVII веке, с 1938 года является районным центром Колпашевского района Томской области с населением около 25 тыс. человек. В результате естественного развития русловых деформаций за период с конца XIX века по 2009 год вершина Колпашевской излучины, а вместе с ней и фронт размыва береговой линии сместились на 2-3 км вниз по течению. Таким образом, уступ надпойменной террасы р. Оби (высота 12-18 м над меженным уровнем, сложен преимущественно мелкими песками), на котором располагается город, стал интенсивно размываться, отступив к настоящему времени на некоторых участках более чем на 1 км (рис. 1). Это привело к возникновению чрезвычайной ситуации для жилого и хозяйственного фонда. Начиная с середины XX века эта проблема стала ключевой для жителей и администрации Колпашево.

В 1960-х годах был разработан целый ряд проектов проведения гидротехнических мероприятий, направленных на стабилизацию береговой линии в черте города. Однако ни один из них не был реализован вследствие очень большой стоимости и неоднозначности оценки их эффективности. Местные власти из десятилетия в десятилетие были вынуждены отселять жителей из аварийных домов, обреченных быть разрушенными вместе с размываемым берегом. В итоге к началу XXI века водным потоком уже было уничтожено несколько улиц в пределах малоэтажной частной застройки (рис. 2 А-Г), стадион, кладбище.

Гидролого-морфологический анализ Колпашевского участка русла Оби показал, что естественный размыв береговой линии в пределах городской территории будет продолжаться и в дальнейшем. Ему благоприятствует концентрированный слив осветленного потока половодья с выклинивающейся непосредственно у Колпашево правобережной поймы и его растекание по широкому левобережному пойменному массиву. Ожидать спрямления излучины и ухода реки от города естественным путем в принципе возможно, так как степень развитости излучины уже давно превысила критические размеры: $l/L=2{,}6$ при $(l/L)_{кр}=1{,}4\text{-}1{,}7$ [2, 4]. За последние несколько столетий выше и ниже Колпашево спрямилось несколько крутых сегментных и омеговидных излучин; другие излучины в целом извилистого русла преимущественно имеют $l/L<1{,}7$. Однако в настоящее время спрогнозировать это затруднительно. Естественный процесс спрямления Колпашевской излучины может растянуться на многие десятилетия, так как в шпоре излучины пойма высокая и транзитный поток через нее возникает только при расходах воды более 11500 м^3/с. Несмотря на снижение среднемноголетних величин размыва Колпашевского яра в последние десятилетия с 10-15 м/год в начале XX века до 3-4 м/год за последние 30 лет (по наблюдениям компании «Томскгеомониторинг» [3]), естественным путем разрушение берега не остановится, и при отсутствии мер защиты оно будет продолжаться в длительной (более 50-100 лет)

Рис. 2 А-Г. Разрушение городской территории в пределах Колпашевского яра

перспективе (рис. 3). Под угрозой размыва в ближайшие 20 лет оказываются расположенный в 50-120 м от бровки яра участок ул. Ватутина – основная магистраль, соединяющая западную и восточную части города, капитальные двухэтажные дома, десятки жилых домов частного сектора, территория аэропорта.

С учетом вышесказанного в 2009 году администрацией Томской области принято решение о разработке предпроектных предложений по выбору оптимального варианта мероприятий, направленных на предотвращение размыва берега у г. Колпашево. Исполнителем работы выступил географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. На основе выполненных инженерных изысканий[1] в пределах 60-километрового участка русла р. Оби было рассмотрено несколько вариантов мероприятий по стабилизации береговой линии в пределах городской застройки г. Колпашево.

Рис. 3. Прогнозируемый размыв территории г. Колпашево к 2060 году

Вариант 1. Укрепление береговой линии в пределах городской части.

Городская территория вытянута вдоль береговой линии р. Оби на 10 км. Возведение берегоукрепительных сооружений потребуется по всей длине размываемого яра на протяжении 3-3,5 км. При этом закреплять размываемую часть берега следует на всю высоту уступа (10-18 м). Максимальное заглубление берегозащитных конструкций должно превышать глубину плесовых лощин (12-14 м от проектного уровня). Если берегоукрепление осуществлять шпунтовым рядом, то потребуется заглубление не менее чем на 5 м ниже существующих минимальных отметок дна у подмываемого берегового уступа.

При укреплении берега габионами или каменной наброской необходимо будет спланировать размываемый берег, существенно уменьшив угол берегового откоса. В подводной части укладка укреплений должна ложиться плащеобразно, перекрывая основание уступа и выстилая прибрежную часть плесовой лощины. В противном случае из-за подмыва основания защитный материал будет смещаться в стрежневую зону потока.

Стоимость берегозащитных сооружений существенно (не менее чем в 3-5 раз) превышает стоимость других мероприятий, ориентируемых на выемку грунта (дноуглубление, спрямление излучины), рассмотренных ниже. К тому же

[1] Помимо авторов статьи в работах принимали участие к.г.н. В.П. Бондарев, к.г.н. Д.В. Ботавин, к.г.н. А.К. Ильясов, к.г.н. И.В. Крыленко, инж. И.В. Крыленко, к.г.н. В.В. Сурков, к.г.н. Л.А. Турыкин.

реализация этого варианта берегозащиты потребует проведения регулярных ремонтных работ.

Вариант 2. Регулирование русла.

Регулирование русла Оби в районе Колпашево может включать в себя:

1. Строительство струенаправляющей дамбы непосредственно выше города у выхода из протоки Матьянги.

2. Возведение серии шпор вдоль размываемого берега.

Струенаправляющая дамба, отклоняющая водный поток от Колпашевского яра, при всех вариантах ее ориентировки будет находиться под постоянным воздействием потока. Она должна быть весеннего регулирования, а ее «голову» необходимо вывести на глубины около 14 м от проектного уровня. При этом дамба будет постоянно подмываться потоком. Вместе с тем размыв правого пойменного берега выше по течению со временем приведет к подходу потока к Колпашевскому яру вдоль нынешней протоки Матьянги, его последующему размыву и ликвидации (частичной или полной) затона ремонтной базы. Влияние же самой дамбы, отводящей поток от правого берега непосредственно ниже устья Матьянги, будет распространяться на расстоянии не более 1 км, где вероятно возникновение мыса; в нижней части Колпашевского яра размыв берега сохранится.

Создание столь масштабных русловыправительных сооружений потребует огромных капитальных вложений, в том числе и для ремонта струенаправляющей дамбы, а их эффективность может оказаться весьма неоднозначной.

Возведение серии поперечных шпор технически трудноосуществимо, учитывая высоту берега и большие глубины русла. Кроме того, они будут постоянно подвергаться разрушению потоком и во время ледохода.

Вариант 3. Отвод фарватера к левому берегу.

Разработка прорези вдоль левого выпуклого берега может быть осуществлена для смещения стрежневой зоны потока от Колпашевского яра. Прорезь должна иметь длину 4-4,5 км и глубину от проектного уровня не менее 4 м. Однако, располагаясь в нижнем крыле излучины в зоне замедления течения и постоянной аккумуляции наносов, она будет неустойчива, станет быстро заноситься и со временем стрежень потока сместится в исходное положение. Таким образом, это будет временное мероприятие, которое лишь на несколько лет приведет к ослаблению размыва правого берега.

Вариант 4. Спрямление Колпашевской излучины.

Колпашевская излучина достигла в своем развитии таких параметров, при которых возможно ее естественное спрямление. Но в настоящее время для этого существуют лишь гидравлические предпосылки. Морфология шпоры излучины препятствует возможному саморазмыву и естественному спрямлению через нее. Это станет осуществимым только при максимальном сближении крыльев смежных излучин вследствие встречного размыва берегов, что при современных темпах деформаций произойдет не ранее чем через 70-100 лет. Возможное спрямление ограничивается также тем, что, во-первых, руслоформирующий расход на Оби проходит в бровках поймы; во-вторых, пойма сильно залесена и закустарена, а основные формы ее рельефа ориентированы поперек движения потока через шпору. Вследствие этого скорости течения потока по пойме минимальны, вплоть до образования застойных (без течения) зон. Разработка спрямляющего канала через шпору должна привести к его саморазмыву, что повлечет постепенный переход в него главного русла.

Из рассмотренных выше вариантов первые три либо не решают проблемы, представляя собой временные мероприятия по снижению интенсивности размыва береговой линии в пределах города, либо подразумевают возведение дорогостоящих сооружений, требующих постоянного мониторинга их состояния и периодического ремонта.

Так, четвертый вариант был принят в качестве оптимального. Создание спрямляющего рукава (канала) кардинально решает основную причину разрушения берега в Колпашево, потому что главное русло отводится от города, а финансовые вложения оказываются меньше, чем при реализации других вариантов. Главным же преимуществом искусственного спрямления является то, что оно опирается на процесс развития излучины, помогая естественному ходу русловых переформирований, ускоряя их и обеспечивая в дальнейшем саморазмыв нового русла и отмирание образовавшегося на месте современного – страрореченья. Это же делает рекомендуемый вариант экологически наиболее безопасным, поскольку следует естественной тенденции развития русла.

Для гидравлического обоснования спрямления излучины были применены методы компьютерного моделирования с использованием современных апробированных численных алгоритмов и ГИС-технологий. Моделирование выполнялось с помощью программного комплекса «Flood» на основе численного решения двумерных уравнений Сен-Венана (мелкой воды) [1]. Исходными данными для построения модели и ее последующей калибровки послужили материалы инженерных изысканий, растровые картографические материалы, данные режимных наблюдений по гидрологическому посту «Колпашево» за многолетний период.

Для построения гидродинамической модели был выбран участок русла и долины Оби в районе Колпашево протяженностью по судовому ходу около 60 км. Размеры моделируемой области выбирались с таким расчетом, чтобы при задании граничных условий по возможности исключить влияние погрешностей в пределах Колпашевской излучины и таким образом приблизить результаты моделирования к реально наблюдаемым параметрам.

Калибровка разрабатываемой модели для выбранного участка осуществлялась на основе данных об измеренных в ходе полевых работ расходов воды, распределении скоростного поля потока и уклонах водной поверхности.

На откалиброванной численной модели были выполнены следующие варианты расчетов:

1. В бытовых условиях для расходов воды:

– 17760 м^3/с (обеспеченность 1%);

– 11500 м^3/с (руслоформирующий в бровках поймы);

– 5500 м^3/с (соответствующий затоплению побочней и осередков);

– 2000 м^3/с (при проектном уровне).

2. Для тех же расходов со спрямляющим каналом шириной 400 м и отметкой дна 49,6 м (в том числе с прогнозом деформаций дна).

3. Для расходов воды 11500, 2000 м^3/с для канала шириной 200 м и отметкой дна 49,6 м.

4. Для расходов 11500 и 17764 м^3/с со струенаправляющими дамбами (короткой и удлиненной), расположенными на правом берегу выше захода в канал (в том числе с прогнозом деформаций дна).

5. Для расхода 11500 м^3/с с полузапрудой (шпорой), расположенной несколько ниже захода в канал на правобережной отмели (в том числе с прогнозом деформаций дна).

Как показали результаты руслового анализа, математического моделирования и прогноза развития русла, при разработке спрямляющего канала произойдет перераспределение в него основного стока воды, последующее расширение канала и превращение старого русла в длинный глубокий залив. Габариты канала должны удовлетворять условиям судоходства на данном участке (глубина – 250 см, ширина – 90 м, радиус кривизны – 800 м). Ими опреде-

ляется необходимая ширина канала и его минимальная глубина в лимитирующий меженный период. Глубина канала должна быть заведомо больше судоходной, чтобы обеспечить переуглубление, которое привело бы к его быстрому саморазмыву, а первоначальная ширина канала должна в 2 раза превышать гарантированную ширину трассы судового хода для обеспечения безопасности плавания. В период строительства канала судоходство может осуществляться по старому руслу, но по его завершении судовой ход следует перевести в канал.

Результаты калибровки для условий, при которых выполнялись измерения, продемонстрировали хорошую сходимость расчетных и натурных данных. Общая картина течения, характера затопления поймы (рис. 4) и участки повышенных скоростей в русле соответствуют натурным данным. Модельное распределение расходов воды по рукавам русла (табл. 1) отличается от измеренных значений на 1-3%, распределение скоростей потока в измеренных поперечниках также оказалось близко к реальным значениям.

Расчеты скоростных полей, выполненные при наличии спрямляющего рукава шириной 400 м для диапазона расходов от 2000 до 17760 м^3/с, показали, что в этом случае от 56 до 43% расхода воды в основном русле (выше захода в канал) станет поступать в канал (табл. 2), вследствие чего у Колпашево скорости течения существенно уменьшатся (рис. 5).

При руслоформирующем расходе скорости течения в узле деления будут приблизительно одинаковыми (около 1 м/с) на входе в канал и в Колпашевскую излучину, но при расходе воды 1%-й обеспеченности скорости в канале будут продолжать оставаться 1 м/с, тогда как на входе в излучину они уменьшатся до 0,6-0,8 м/с, а далее по излучине – до 0,4-0,6 м/с и ниже. При расходах воды меньше руслоформирующего скорости течения в канале будут выше, чем в основном русле. Это говорит о том, что русло канала будет размываться, а отложение наносов на входе в канал в среднем (по реализациям паводков) будет меньше, чем на входе в излучину, что в конце концов приведет к ее отмиранию. В то же время прогнозные расчеты с учетом деформаций дна (рис. 6) показывают, что в узле разветвления на начальном этапе после сооружения канала будет наблюдаться отложение наносов. Это объясняется увеличением при введении канала в эксплуатацию суммарного живого сечения потока и уменьшением средних скоростей течения. Поэтому, возможно, в первые годы придется производить дноуглубительные работы на входе в канал (отсыпая при этом грунт в районе входа в излучину). Однако при больших глубинах русла на входе в канал ожидать повышения отметок дна до лимитирующих значений не приходится, и предлагаемые землечерпательные работы будут больше рассчитаны на сохранение пропускной способности канала.

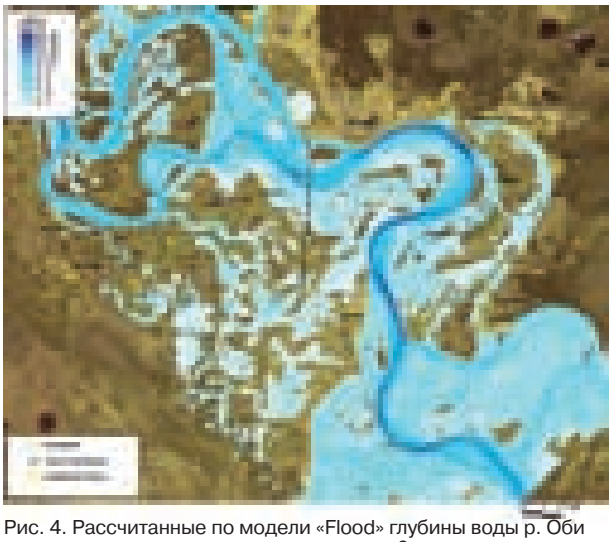


Рис. 4. Рассчитанные по модели «Flood» глубины воды р. Оби у г. Колпашево при расходе воды 12000 м^3/с

Таблица 1

Измеренное и рассчитанное по модели «Flood» распределение расходов воды р. Оби по рукавам при расходе воды 12000 м^3/с

Створ	Измеренные расходы воды		Рассчитанные по модели расходы воды	
	м^3/с	% от общего расхода	м^3/с	% от общего расхода
р. Обь – основное русло выше предполагаемого спрямляющего канала	11780	98	11645	97
р. Обь – Канеровская протока	6848	57	6366	53
р. Обь – разветвление в 1,6 км выше устья р. Чаи, 1280 км, судоходный рукав	5146	42	4677	39
р. Обь – протока Ильинская ниже отхода рукава Матьянга	1286	11	1173	10
р. Обь – протока Налимовская	2166	18	2310	19

Таблица 2

Поступление воды в спрямляющий канал шириной 400 м по данным моделирования при различных расходах р. Оби

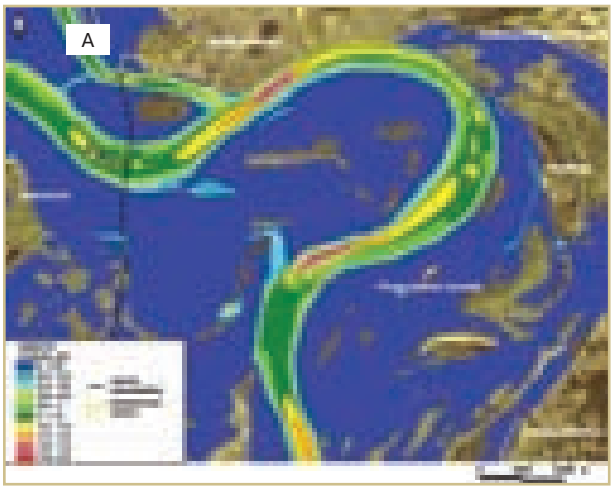
Общий расход воды, м^3/с	Расход воды в основном русле выше канала, м^3/с	Расход воды, поступающий в канал	
		м^3/с	% от расхода в основном русле
2000	2000	1130	56
5500	5500	2845	52
11500	11155	5218	47
17764	14829	6350	43

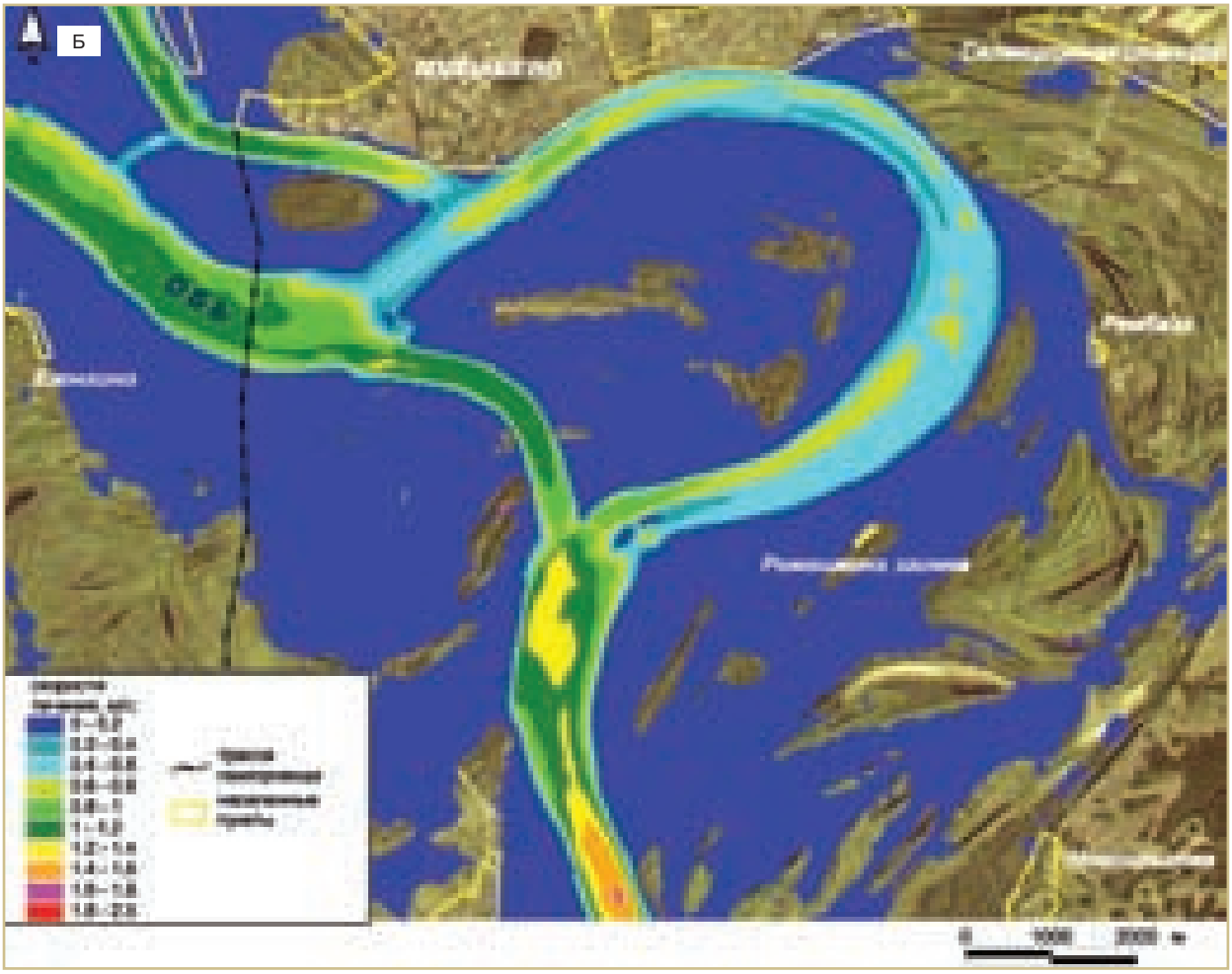
Как показывает опыт, естественное спрямление излучины можно ускорить путем создания струенаправляющей дамбы либо подпорной полузапруды, которые обеспечивают более благоприятное сопряжение русла с каналом. Стоит отметить, что полученные результаты моделирования с наличием двух вариантов струенаправляющей дамбы и полузапруды показали не только ухудшение картины скоростного поля в узле разветвления, но и увеличение скоростей потока именно на входе в Колпашевскую излучину, и, следовательно, вход в канал будет интенсивнее заноситься. По-видимому, более эффективным в этом случае явилось бы строительство вододелительной встречной шпоры у стрелки в узле разделения потока. Но такое сооружение будет неоправданно дорогостоящим, поскольку его придется возводить на больших глубинах и серьезно укреплять от воздействия течения. Поэтому строительство в дополнение к каналу каких-либо регулирующих поток сооружений представляется нецелесообразным.

Рекомендуемая начальная ширина канала устанавливается в 200 м, что обеспечивает безопасность судовождения, поэтому также были получены результаты моделирования и для этого случая. Скорости течения по длине канала (исключая входной участок) будут даже выше, чем при ширине канала 400 м (рис. 7). Это объясняется большим перепадом уровней между началом и концом канала, что создает условия для его интенсивного развития и естественного достижения им ширины 400 м.

Таким образом, разработка спрямляющего канала ускорит естественное спрямление Колпашевской излучины, приведет к последовательному переходу в него основного расхода воды и будет способствовать затуханию и постепенному прекращению разрушения берега в черте города. Необходимо учитывать, что даже после завершения актив-

Рис. 5. Рассчитанные по модели «Flood» скорости течения р. Оби у г. Колпашево при расходе воды 11500 м^3/с: А – в бытовых условиях; Б – при сооружении спрямляющего канала шириной 400 м





ной фазы воздействия водного потока, склоновые процессы будут продолжаться до приобретения берегами угла естественного откоса. Поэтому важно обратить внимание на коммуникации и строения, находящиеся в пределах 50-метровой зоны от бровки берега после реализации проекта спрямления Колпашевской излучины, потенциально подверженной склоновым процессам.

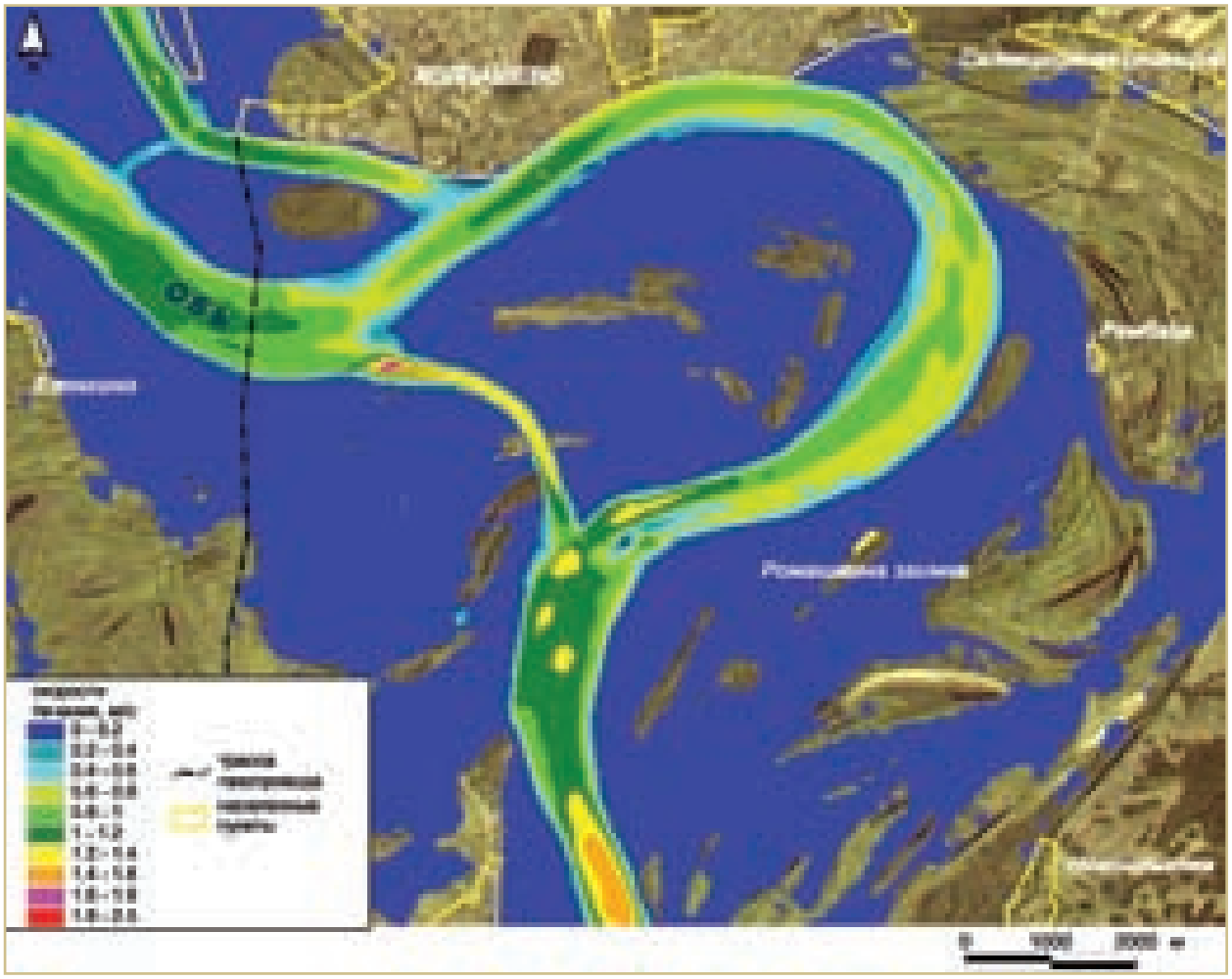
В настоящее время начата разработка технико-экономического обоснования проектных предложений стабилизации русла в пределах г. Колпашево. Если не возникнет задержек с финансовым обеспечением подготовки проектной документации, мероприятия по спрямлению Колпашевской излучины могут начаться в ближайшие 2-3 года.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Беликов В.В., Милитеев А.Н. Комплекс программ для расчета речных течений «Flood» // Российское агентство по патентным и товарным знакам. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2002610941. М. 2002.
2. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР. 1955.
3. Технический отчет «Выполнение работ по проведению сбора исходных данных для технико-экономического обоснования «Программы работ по спрямлению русла р. Оби в районе г. Колпашево». ОАО «Томскгеомониторинг». Томск. 2008.
4. Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излучины. М.: Изд-во МГУ. 2004.

Рис. 6. Рассчитанные по модели «Flood» деформации дна р.Оби у г. Колпашево при руслоформирующем расходе воды (11500 м^3/с) в случае сооружения спрямляющего канала

Рис. 7. Рассчитанные по модели «Flood» скорости течения р. Оби у г. Колпашево при расходе воды 11500 м^3/с при сооружении спрямляющего канала шириной 200 м



АННОТАЦИИ

Об автоматическом управлении движением судна по заданной траектории / Михальский В.А., Катенин В.А., Бойков А.В.// Речной транспорт (XXI век). 2010. – № 1 (43). – с. 68

Даны рекомендации по определению параметров автоматического управления движением судна по заданной траектории с использованием электронной картографической навигационной информационной системы.

Ключевые слова: движение судна, траектория, автоматическое управление, электронная картографическая навигационная информационная система.

Контактная информация: boykovalexey@bk.ru

Обоснование методики расчета параметров обратного фильтра в основании судоходного шлюза с конструктивными элементами, выполненными из нетканых геосинтетических материалов / Ментюков В.П., Письменский В.В.// Речной транспорт (XXI век). 2010. – № 4 (46). – с. 70

Предложена методика расчета параметров обратного фильтра в основании судоходных шлюзов с конструктивными элементами из нетканых синтетических материалов с целью повышения надежности гидротехнических сооружений.

Ключевые слова: геосинтетические материалы, гидротехническое строительство, обратные фильтры, параметры фильтрации.

Контактная информация: vvpismensky@gmail.com

Пространственно-спектральный подход в информационном обосновании требований к изыскательским работам на ВВП / Моторин С.В., Голышев Н.В., Ботвинков А.В., Тюменцев А.А., Абдрашев А.Р. // Речной транспорт (XXI век). 2010. – № 2 (44). – с. 75

Предложен пространственный спектральный подход для оценивания требований к проведению промеров при изыскательских работах на ВВП, учитывающий особенности рельефа дна русла реки. Проведено компьютерное моделирование в среде Mathcad и создана информационная поддержка в среде Matlab.

Ключевые слова: промеры, изыскательские работы, ВВП, компьютерное моделирование, пространственный спектральный подход.

Контактная информация: info@nsawt.ru

Результаты моделирования спрямления русла р. Оби в районе г. Колпашево / Беликов В.В., Завадский А.С., Рулева С.Н., Чалов Р.С. // Речной транспорт (XXI век). 2010. – № 3 (45). – с. 82

Приводятся результаты проведенных в 2009 году работ по выбору, обоснованию и моделированию оптимального варианта мероприятий, направленных на прекращение размыва берега в пределах Колпашевской излучины; даны рекомендации по разработке в ее шпоре спрямляющего рукава.

Ключевые слова: моделирование, размыв берега, спрямляющий рукав.

Контактная информация: az200611@rambler.ru