

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПО ЗАЩИТЕ БЕРЕГОВ (НА ПРИМЕРЕ РЕКИ ДОН В РАЙОНЕ ГОРОДА ПАВЛОВСКА)

© 2014 г. А.В. Богомолов^{1,2}, А.П. Лепихин^{1,2}, А.А. Тиунов¹

¹ Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь

² Камский филиал ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Пермь

Ключевые слова: моделирование, водотоки, берегоукрепление, р. Дон.



А.В. Богомолов



А.П. Лепихин



А.А. Тиунов

На основе вычислительных экспериментов в двумерной постановке рассмотрены особенности изменения динамики течений р. Дон при реализации различных вариантов берегоукрепления в районе г. Павловска Воронежской области. Проведена оценка эффективности различных вариантов берегоукрепления при прохождении половодий заданной обеспеченности. Для оценки использовали изменения поля скоростей для разных сценариев. Показано, что максимальная интенсивность размыва берега не всегда наблюдается при максимальных расходах воды, что подтверждается кинематическим эффектом Железнякова.

Характерной особенностью р. Дон в районе г. Павловска Воронежской области является разделение ее русла на два рукава. В 1709 г. по указу Петра I на берегу одной из протоков были основаны военная верфь и русская крепость. Для сохранения макроформы русла р. Дон создана достаточно эффективная система, включавшая вододельитель и струенаправляющие шпоры [1].

Анализ имеющихся картографических материалов XVIII в., середины и конца XX в. показал, что существенных изменений в конфигурации берега в районе г. Павловска не наблюдалось, при этом река активно использовалась для судоходства и лесосплава (рис. 1).

Однако с начала 1990-х годов постоянное судоходство на этом участке практически прекратилось. В связи с этим перестал выполняться комплекс мероприятий по поддержанию гарантированных глубин в основном русле р. Дон. Протока Басовский рукав интенсивно развивалась за счет прохождения через нее значительной доли паводочных расходов, при этом основное русло р. Дон начало заноситься и мелеть. С целью пропуска значительной доли расходов по основному руслу р. Дон в 2006 г. на протоке Басовский рукав было завершено строительство каменной плотины в 350 м выше устья. Плотина должна была сдерживать паводочные расходы воды с обеспеченностью $P \geq 10\%$ и направлять их по основному руслу. Создание плотины привело к существенному увеличению паводочных расходов воды по основному руслу, следствием чего стали интенсивный размыв и активизация оползневых процессов на левом берегу р. Дон в районе г. Павловска и отступление верхней бровки береговой полосы с интенсивностью от 1,8 до 6,0 м/год. При этом на отдельных участках селитебной территории г. Павловска обрушение береговой бровки за период эксплуатации плотины приблизилось к жилым застройкам на расстояние от 6 до 10 м, съедание бровки достигло 30 м.

Для предотвращения дальнейшего разрушения берегового откоса ООО «Севкавгидропроект» разработал проект «Берегоукрепление р. Дон в районе г. Павловска Павловского муниципального района Воронежской области», реализация которого предполагает укрепление берегового откоса габионными конструкциями, возведение береговых шпор и проведение дноуглубительных работ [2]. Для оценки эффективности данного проектного решения выполнено численное моделирование участка р. Дон в районе г. Павловска.

Исходными материалами для построения модели стали результаты детальной батиметрической съемки данного участка водотока, материалы геодезической съемки прибрежной полосы, результаты гидрометрических измерений, включавшие измерение скоростей потока в четырех створах и определение гранулометрического состава донных отложений.

Ввиду того, что берегоукрепление проектировалось для условий прохождения половодья 5 % обеспеченности, первоначальный выбор сценариев был обусловлен такими же критериями. Выполнено моделирование по пяти сценариям, соответствующим:

1. Современной морфометрии как основного русла, так и протоки Басовский рукав (расход паводка 5 % обеспеченности).
2. Полному демонтажу плотины в протоке Басовский рукав.

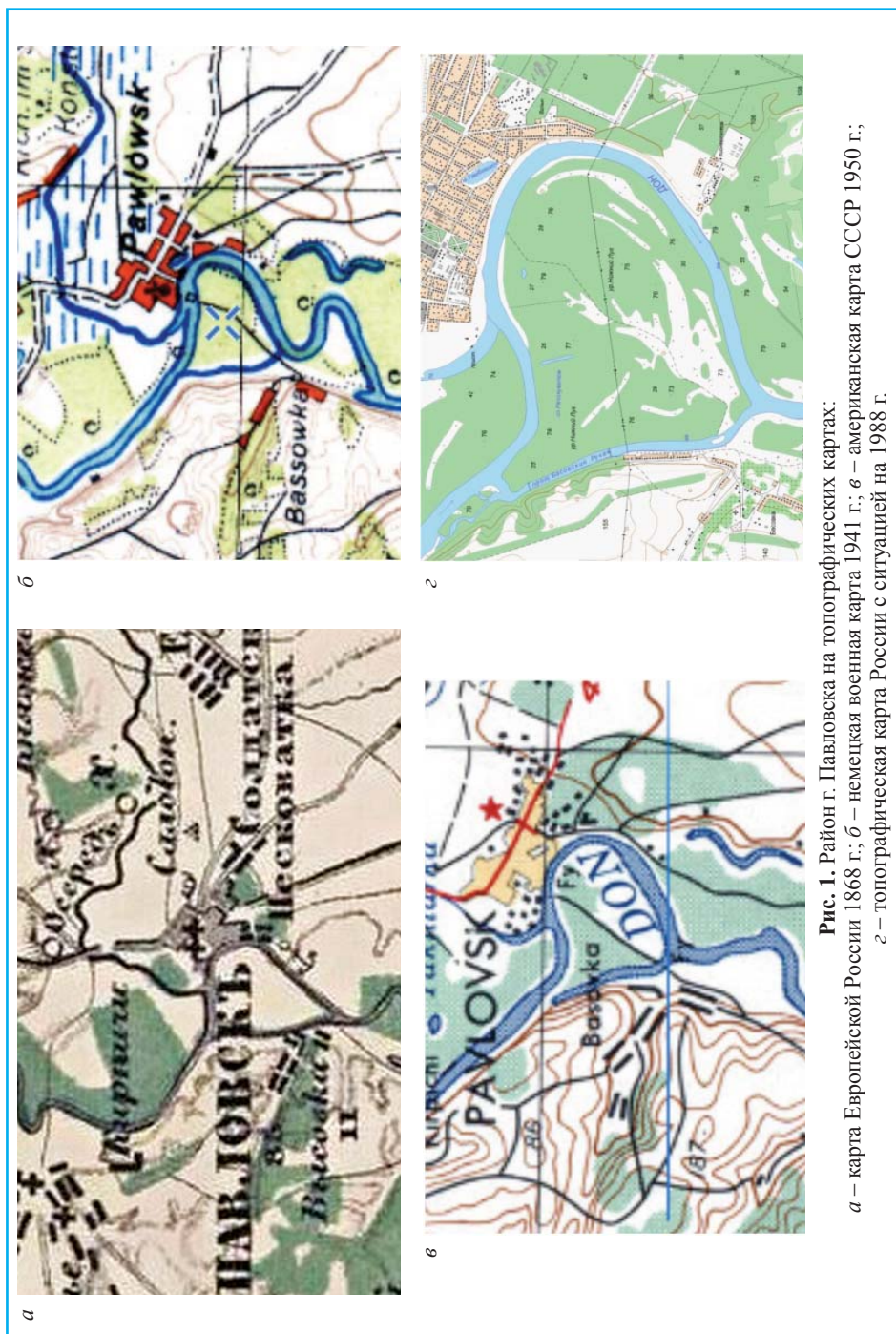


Рис. 1. Район г. Павловска на топографических картах:
 а – карта Европейской России 1868 г.; б – немецкая военная карта 1941 г.; в – американская карта СССР 1950 г.;
 г – топографическая карта России с ситуацией на 1988 г.

3. Строительству берегоукрепительных сооружений и расчистке русла р. Дон при наличии плотины в протоке Басовский рукав.

4. Частичной реализации проектных решений: расчистка русла р. Дон и строительство струенаправляющих шпор, без крепления берега матрацами «Рено», при наличии плотины в протоке Басовский рукав.

5. Реконструкции существующей плотины в переливную плотину в нижней части протоки.

Для обеспечения корректной оценки распределения поля скоростей и степени разрушения берега на рассматриваемом участке р. Дон (500 м выше протоки Басовский рукав – 500 м ниже протоки) необходимо выполнение расчетов в двумерной постановке.

Двумерная (в горизонтальной плоскости) модель для рассматриваемого участка р. Дон выполнена с использованием специализированного гидродинамического пакета SMS v.10.1 американской компании AQUAVEO LLC, разработанного по заказу и при участии Центра гидравлических исследований США. В ее основе лежат несколько модулей (RMA2, RMA4, FESWMS, TUFLOW и др.), которые позволяют решать различные задачи. Для выполнения поставленной задачи использован модуль RMA2 [3, 4]. Модуль RMA2 численно реализует двумерную усредненную по глубине конечно-элементную гидродинамическую модель. Модуль решает уравнения в форме Рейнольдса для турбулентных течений, полученных из уравнений Навье–Стокса методом конечных элементов [4]. Он рассчитывает уровни водной поверхности и горизонтальные компоненты поля скоростей. Особенности использования данного программного продукта для решения конкретных водохозяйственных задач рассмотрены в [5, 6].

Модель требует задания начальных условий – расход воды определенной обеспеченности в верхнем створе участка моделирования и граничных условий – уровень воды на нижнем створе участка моделирования. При моделировании использовали комбинированный подход. Первоначально выполнено одномерное моделирование с помощью программного продукта HEC-RAS v.4.1. На основе этой модели получены данные об изменении распределения коэффициентов шероховатости.

Верификация полученной модели выполнена для условий межени. Сравнительный анализ измеренных и расчетных скоростей показал, что величины отклонений составляют 2–10 %, что сопоставимо с точностью измерения и вычисления скоростей потока. При моделировании береговые откосы принимались неразмываемыми. Для различных сценариев строили собственную цифровую модель дна и берегов с заданием собственных величин гидравлических сопротивлений на каждом характерном участке. Прогнозные величины размыва берега оценивали по величинам поля скоростей в прибрежной зоне, учитывая наличие жесткой связи между величиной скорости потока и расходом взвешенных наносов.

Результаты моделирования по представленным сценариям показали, что при прохождении половодья 5 % обеспеченности происходит значительное повышение уровня воды – на величину до 10–11 м над меженным уровнем. Это приводит к подтоплению прилегающей территории, в т. ч. практически всей площади острова, что в свою очередь распластывает поток и снижает его скорости (рис. 2а). В районе плотины на протоке Басовский рукав происходит перелив через ее гребень. Высота стояния уровня воды над гребнем

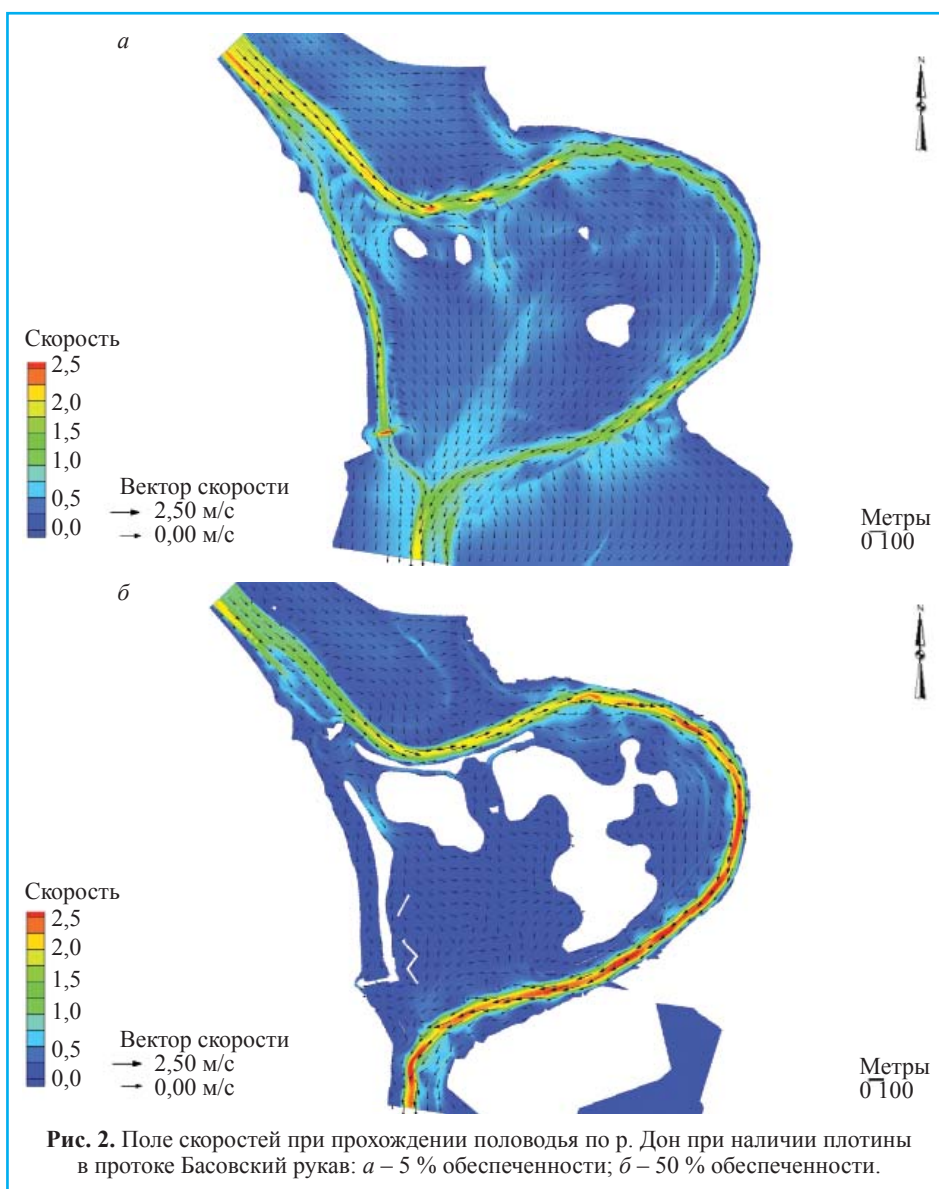


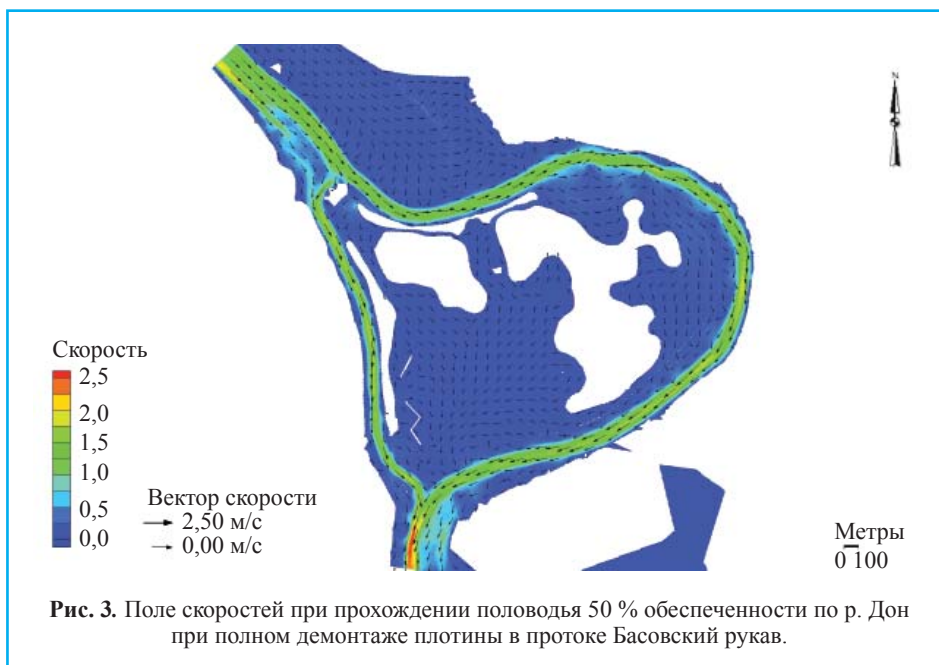
Рис. 2. Поле скоростей при прохождении половодья по р. Дон при наличии плотины в протоке Басовский рукав: а – 5 % обеспеченности; б – 50 % обеспеченности.

плотины составляет около 2 м. Максимальные скорости наблюдаются в основном русле р. Дон на следующих участках: выше острова до впадения р. Осередь до 2,3 м/с; в районе соснового бора, ниже г. Павловска до 1,6 м/с; ниже впадения протоки Басовский рукав в р. Дон, на повороте до 1,9 м/с. На остальных участках скорость потока на стрежне составляет 1,2–1,5 м/с. В протоке Басовский рукав по стрежню скорости течения достигают 1,7 м/с, в районе плотины – 2,7 м/с. Уровень воды превышает гребень плотины на 2,6–2,7 м. Ниже плотины скорости потока в протоке падают до 0,5–0,7 м/с. Над затопленной частью острова скорости течения составляют 0,2–0,4 м/с. Реализация планируемых проектных решений по защите берега в этом случае не приведет к значительным изменениям поля скоростей при прохождении половодья 5 % обеспеченности.

Проведенный анализ последствий прохождения половодий последних лет показал необходимость выполнения модельных расчетов для половодья 50 % обеспеченности. Принципиальным отличием прохождения половодья данной обеспеченности является то, что в этом случае не происходит перелива через гребень плотины в протоке Басовский рукав. В результате доминирующая часть водной массы проходит по основному руслу р. Дон (рис. 2б). Средние скорости потока в районе проблемного участка возрастают в 2,0–2,5 раза относительно сценария прохождения половодья 5 % обеспеченности. Максимальная скорость потока составляет 2,9 м/с. Таким образом, прохождение половодья меньшей обеспеченности может привести к увеличению интенсивности размыва левого берега реки и скорости подступления бровки к жилым домам в районе города.

Реализация предлагаемых проектных решений (проведение дноуглубительных работ на участке р. Дон в районе г. Павловска общей протяженностью 2,3 км, устройство габионных конструкций на левом берегу р. Дон на участке протяженностью 1,1 км) при прохождении половодья 50 % обеспеченности позволит на защищаемом участке отклонить поток к правому берегу и снизить скорости потока у левого берега. На нижележащем участке при этом будет наблюдаться увеличение скоростей потока, соответственно и интенсивности размыва берега. При полном демонтаже плотины скорости течения, а соответственно и интенсивность размыва существенно снижаются (рис. 3).

Поэтому в сложившихся условиях наиболее оптимальным решением для рассматриваемого участка является демонтаж существующей плотины в протоке Басовский рукав. Это приведет к снижению паводочных расходов по основному руслу и уменьшению нагрузки на берег. Однако данный вариант не решает проблему его дальнейшего обрушения, необходимо предусмотреть дополнительные мероприятия по закреплению и предотвращению разрушения берегового откоса, выведенного из устойчивого состояния.



Проведенный анализ реализованных в последние годы и планируемых мероприятий по улучшению экологического состояния и условий водопользования р. Дон показывает, что их выполнение без оценки на основе гидродинамического моделирования может привести к нежелательным результатам. Негативные последствия отрицательного действия вод могут возникать не только при максимальных расходах воды, но и в ситуациях, близких к 50 % обеспеченности расходов. Выполненные вычислительные эксперименты подтверждают кинематический эффект Железнякова, открытый еще в 1947 г. [7].

Результаты гидродинамического моделирования позволяют избежать неэффективного расходования бюджетных средств и выбрать наиболее оптимальный вариант решения существующей водохозяйственной проблемы на участке р. Дон в районе г. Павловска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыжавский Г.Я. Верхний Дон. М.: Физкультура и спорт, 1984. 32 с.
2. Берегоукрепление реки Дон в районе г. Павловска Павловского муниципального района Воронежской области. Пояснительная записка. ООО «Севкавгидропроект». 2011.
3. Brunner G.W. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Version 4.0. March 2008. Режим доступа: <http://www.hec.usace.army.mil>.
4. Donnell B.P., Letter J.V., McAnally W.H. and others. Users Guide for RMA2 Version 4.5. 9 Sept. 2009. Режим доступа: <http://chl.wes.army.mil/software/tabs/docs.htm>.

5. Лепихин А.П., Перепелица Д.И., Тиунов А.А. Анализ и обоснование возможных схем защиты г. Кунгура от наводнений // Водное хозяйство России. 2007. № 2. С. 80–93.
6. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Ляхин Ю.С., Тиунов А.А., Богомолов А.В., Перепелица Д.И., Паршакова Я.Н. Гидродинамическое моделирование реки Вятки в среднем течении: постановка задачи, результаты расчетов // Водное хозяйство России. 2013. № 3. С. 16–32.
7. Железняков Г.В. К исследованию естественных открытых русловых потоков // Изв. АН СССР, ОТН. 1949. № 2. С. 14–16.

Сведения об авторах:

Богомолов Андрей Владимирович, аспирант, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78; инженер, Камский филиал ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (КамНИИВХ), 614007, г. Пермь, ул. Народовольческая, 33; e-mail: whitewing85@mail.ru

Лепихин Анатолий Павлович, д-р геогр. наук, профессор, заведующий лабораторией, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78; директор, Камский филиал ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (КамНИИВХ), 614007, г. Пермь, ул. Народовольческая, 33; e-mail: lepihin49@mail.ru

Тиунов Алексей Александрович, младший научный сотрудник, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78; e-mail: anywiny@hotmail.com