

труда» и посвящение молодых специалистов в профессию с вручением памятных сувенирных медалей и премий.

Все это позволяет с уверенностью сказать, что РУП «Белгипроводхоз» удерживает завоеванные позиции на рынке проектно-испытательских работ, находится на хорошем счету в республике и приглашает заинтересованных к тесному и плодотворному сотрудничеству по различным направлениям.

УДК. 681.518.3. 551.501. [556.535+551.577]

В.П. Рогунович (БНТУ)

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОДНОГО РЕЖИМА В СЛОЖНЫХ БАССЕЙНАХ РЕК

В последние десятилетия во многих странах возникали большие ущербы от паводков и наводнений. Случаются даже человеческие жертвы. В работе сделана попытка анализа причин современного обострения явления и выработки на ближайшую перспективу предложений по уменьшению потерь. Представляется, что основными причинами могут быть глобальное потепление климата и активное обустройство пойм. Уменьшение ущербов возможно на данном этапе на основе уточнения математического моделирования водного режима обустроенных пойм и территорий.

Несмотря на многовековой опыт защиты от затоплений, усовершенствование строительных технологий и выполнение больших объемов работ, все чаще затопляются обустроенные поймы. Возникают чрезвычайные режимы уровней и расходов там, где гидрологическая ситуация представлялась вполне прогнозируемой и обеспеченной. Ущерб от затоплений защищенных земель и обустроенных территорий продолжают увеличиваться во всех странах. Возникла парадоксальная ситуация: чем выше уровень цивилизации, тем больше ущерб от затоплений. Только в 2005г. в период весенних паводков на Беларуси были подтоплены 300 жилых домов, 1493 подворья, 329 хозяйственных построек, 584 промышленные постройки, 100 зданий различного назначения, 12 га сельхозугодий.

Частично была нарушена жизнедеятельность 4385 человек [2]. Суммарный среднегодовой ущерб от наводнений в Беларуси оценивается в 150 млн. руб. (в ценах 1990г.) [11] Установлено увеличение экстремальных величин стока в период после 1965г. на Припяти с 14 % до 30 %, на Западной Двине с 16 % до 26 % [4].

Поэтому, с одной стороны, необходимо выяснять причины современного обострения явления, а с другой, – разрабатывать предложения по уменьшению потерь от затоплений.

По поводу причин можно сказать следующее. Одной из них может быть глобальное потепление климата. Глобальное потепление привело в последние десятилетия на Беларуси к регулярному положительному приращению температур приблизительно на + 0,4 °С по отношению к средней многолетней: 1971-1980 гг.от -0,3 °С до +0,0 °С, 1981-1990 гг. приблизительно +0,4 °С, 1991-2000 гг. приблизительно +0,8 °С [7]. Оно приводит к гидрологическим условиям формирования паводков, отличных от расчетных, использованных при проектировании систем защиты.

Второй причиной может быть интенсивное обустройство и хозяйственное использование долин рек, трансформирующих водный режим водотоков. Обе причины совместно и порознь приводят к новым условиям формирования водного режима паводков и наводнений в бассейнах рек.

Надежное восстановление естественных рядов стока, когда начали систематически влиять климатические факторы в условиях постоянно обустраивающихся территорий пойм практически невозможно, а следовательно, нельзя надежно планировать защитные мероприятия по изменяющимся гидрологическим условиям.

Представляется, что в складывающейся новой гидрологической и хозяйственной ситуации в бассейнах рек можно в значительной мере уменьшить ущерб от затоплений на первом этапе за счет повышения точности математического моделирования современной системы водотоков бассейна реки, прежде всего учетом средствами идентификации новых особенностей движения воды на обустраивающихся долинах рек. Надежный учет постепенно изменяющихся гидрологических условий в бассейне реки, вызванных потеплением климата, а также и обустройством пойм возможен на втором этапе за счет создания измерительных информационных систем [8].

Обратим внимание на существенные особенности движения воды в сложных бассейнах рек со спокойным как в Беларуси рельефом.

Во время паводков и наводнений весьма часто потоки воды выходят на широкие поймы и затапливают залесенные, закустаренные, используемые в сельском хозяйстве земли и обустроенные территории. На различных частях поймы из-за залесенности и закустаренности, плотность которой значительно изменяется в течение года, сопротивление движению воды существенно изменяется, возникают непроточные, «нетранзитные» зоны, размеры которых изменяются по сезонам в зависимости от состояния растительного покрова и глубины воды. При обтекании сооружений на обустроенных территориях также возникают нетранзитные зоны, но они более стабильны. Все нетранзитные зоны фактически играют роль аккумулярующих емкостей и могут быть значительными. К примеру, в бассейне реки Припять ширина поймы достигает 20 – 30 км, причем при определенных уровнях воды нетранзитные зоны достигают $\frac{3}{4}$ ширины. Аналогичная проблема нетранзитных зон возникает и за животноводческими комплексами, которых в поймах рек только в республике Беларусь десятки. Все это существенно влияет на режимы затоплений в бассейнах рек.

Существенные особенности движения воды в сложных системах водотоков бассейнов рек невозможно учесть, непосредственно используя в качестве исходной систему уравнений движения Сен-Венана. Исследования В.С.Никифоровской [3] показали, что приемлемой точности моделирования не достичь как при условии учета всей поймы как аккумуляющей емкости – М.В. Эббот, – так и при учете сечения поймы суммарно с сечением водотока по обычным гидравлическим зависимостям. Поэтому на основе использования работ школы акад. РАН Васильева О.Ф., а именно: Атавина А.А., Воеводина А.Ф., Гладышева М.Т., Шугрина С.М., нами [5] была предложена обобщенная система одномерных уравнений движения. При получении уравнения непрерывности использован закон сохранения массы. В него вошли, естественно, характеристики всего сечения водотока, включая русло и пойму. В динамическом уравнении движения предложено использовать только характеристики транзитных частей сечения, поскольку оно получено из закона сохранения импульса, который в нетранзитных зонах сечения равен

нулю. Нетранзитные зоны сечений выделяются по специальной методике, итеративно учитывающей локальное сопротивление движению воды над каждым элементом периметра по условию, что скорость движения воды над каждой нетранзитной зоной существенно меньше средней в сечении. Таким образом, получены следующие обобщенные уравнения нестационарного движения воды [5, 6], пригодные к использованию в случаях выхода потока на сложную пойму:

$$\begin{cases} B_0 \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + 2\beta v \frac{\partial Q}{\partial s} + (c^2 \cos \theta - \beta v^2) B \frac{\partial h}{\partial s} = gA \sin \theta - gA \frac{Q|Q|}{K^2} + \beta v^2 \frac{\partial A}{\partial s} \Big|_h \end{cases}$$

где Q – расход воды, м³/с;
 A – площадь живого сечения, м²;
 B_0 – ширина водного сечения, м;
 B – ширина живого сечения, м;
 h, s – гидравлическая ортогональная правая система координат, у которой ветвящаяся ось s проходит через минимальные отметки дна, м;

$c = \sqrt{gA/B}$ – скорость распространения малых возмущений, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

t – время, с;

v – средняя в сечении скорость потока, м/с;

β – коэффициент удельного количества движения (коэффициент Буссинеска);

θ – угол наклона линии, соединяющей минимальные отметки дна характерных сечений водотока, отсчитываемый против часовой стрелки от положительного направления оси s до горизонтальной плоскости на данном локальном участке бассейна реки, рад.

Заметим, что в случае отсутствия нетранзитных частей сечения $B_0 = B$ и предложенные уравнения движения превращаются в одну из форм записи уравнений Сен-Венана.

Казалось бы естественным использование для математического моделирования водного режима в сложных бассейнах рек программного комплекса SMS – SURFACE-WATER MODELING SYSTEM. Он использует в качестве исходной информации данные Географической Информационной Системы и возможности одно- и двумерного моделирования водного режима в бассейнах рек. Однако в имеющихся описаниях SMS не излагаются важнейшие исходные научные положения, использованные при создании системы:

– как осуществляется интерполяция параметров уравнения движения во времени и пространстве при моделировании водного режима?

– как оценены ли погрешности моделирования по измерениям на эталонном объекте?

Неясность названных, а также подобных других вопросов мешает формальному использованию SMS, тем более, что многие вопросы требуют не только программной, но и глубокой гидродинамической проработки.

Представленные выше обобщенные уравнения движения были использованы для моделирования водного режима в бассейне реки Припять, где практически регулярно – 9 раз в 10 лет – возникали ущербы от паводков и наводнений в сотни миллионов долларов США. Поэтому проблема защиты поселений и сельхозугодий от затопления в бассейне р. Припять существовала давно, однако значительные практические мероприятия по ее решению были предприняты на государственном уровне лишь в 70-80 годы.

На рисунке 1 представлены граф-схема сложной системы водотоков бассейна р. Припять суммарной длиной 1,1 тыс. км.

Моделирование водного режима выполнялось совместно с Белгипроводхозом для обоснования инженерных решений системы защиты от затоплений десятков поселений и 400 тыс. га земель на основе представленных выше обобщенных уравнений нестационарного движения воды [6]. Отметим, что моделирование движения воды на графе типа "дерево" позволило установить существенную интересную особенность движения воды в окрестности устья р. Горынь, а именно: в случае, если по Горыни идут большие расходы, соизмеримые с расходом р. Припять, то выше устья Горыни, как показало моделирование, Припять течет вспять. Этим можно объяснить

большие затопления в окрестности устья Горыни. При большой ширине поймы и наличии многих нетранзитных зон обнаружить движение реки вспять инструментальными средствами невозможно. Дать научное объяснение явления позволили методы математического моделирования.

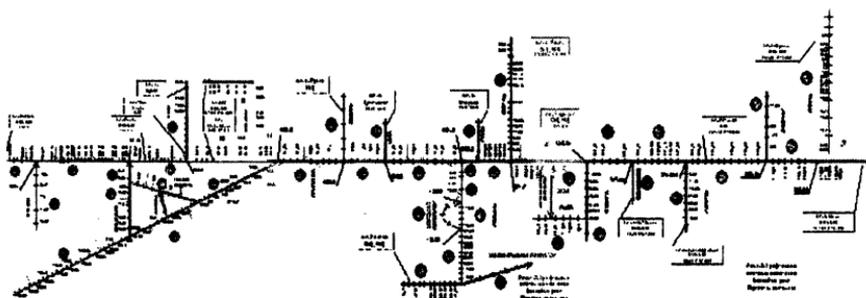
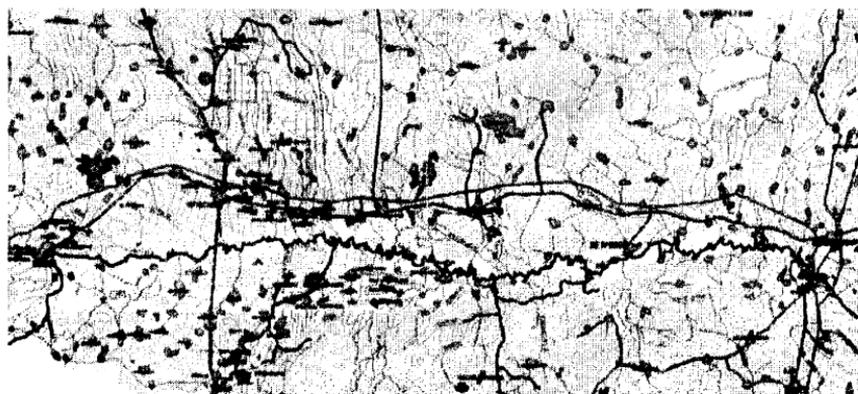


Рисунок 1 – Граф-схема водотоков р. Припять

Средняя погрешность вычисления максимального уровня в системе естественных водотоков бассейна вероятностью 0,95 равна 0,1 м, а с вероятностью 0,99 она не превышает 0,25 м. Это дало возможность Белгипроводхозу результаты математического моделиро-

вания положить в основу определения высотного положения дамб системы обвалования.

Заметим, что прежде чем выполнить моделирование такого сложного объекта, было проведено тестирование комплекса программ на известном эталонном объекте по измерениям ГТИ водного режима р. Тверца, которое дало весьма удовлетворительные результаты.

Таким образом, имеются необходимые предпосылки для создания математических моделей водного режима сложных систем водных объектов.

В настоящее время находятся в эксплуатации 25 ГЭС общей мощностью 10 МВт [1]. По перспективной программе развития ГЭС планируется построить на крупных реках (Западная Двина, Днепр, Неман) 9-10 водохранилищ, расположенных выше городов (Полоцк, Новополоцк, Могилев, Гродно). Начато проектирование ГЭС на Западной Двине. При проектировании и затем эксплуатации упомянутых водных объектов уместно и даже необходимо использовать имеющийся опыт математического моделирования водного режима систем водотоков.

Отметим две существенные особенности математического моделирования водного режима пойм на городских территориях, которые, как правило, обустройстваются волевыми решениями. Во-первых, на многих водотоках необходимо выполнять моделирование, когда имеется верховое водохранилище и много водохранилищ иного порядка и гидросооружений на водотоках. В этом случае формулировка задачи существенно осложняется необходимостью учета многих внутренних граничных условий, моделирующих работу гидротехнических сооружений, которое сложно само по себе. Во-вторых, создание больших водохранилищ в районах выше крупных городов требует моделирования прерывных волн, образующихся в случае разрушения подпорных сооружений.

Принципиально вопросы движения волн прорыва достаточно детально изучены школой академика РАН Васильева О.Ф. в ИГиЛ СО РАН – Притвиц Н.А., Шугрин С.М., Гладышев М.Т., – в том числе и в случае движения волны прорыва и «посуху», т.е. на пойме. Все же прерывная волна достаточно быстро усполаживается, поэтому дальнейшее моделирование выполняется описанными выше методами.

При всех достоинствах и возможностях методов и средств математического моделирования они позволяют лишь уточнить водный режим обустроенных пойм. Надежность этой оценки не может быть высокой, так как изменяется обустройство территорий, примыкающих к водотокам, изменяется климат. Это приводит к невозможности задания с высокой точностью граничных условий и боковой приточности при создании математической модели, поэтому из-за невысокой точности моделей становится невозможным надежное прогнозирование водного режима, неожиданно возникают экстремальные уровни и расходы и их следствие – чрезвычайные ситуации.

Для надежного и высокоточного прогноза в таких условиях необходимо в будущем в создавать автоматические измерительные системы окрестности паводкоопасных объектов, а затем в бассейне реки в целом [8]. В настоящее время уже имеются необходимые предпосылки их создания, а именно: представленные математические модели имеются и автоматические средства измерений уровней и расходов воды в сложных сечениях водотоков [8], созданы метрологически обеспеченные [9] основы центра передачи, приема и обработки данных наблюдений [10].

Математические модели – одно из основных средств, использующихся для обоснования эффективных проектных и управленческих решений в ординарных и чрезвычайных ситуациях. Например, где, в каком водохранилище и в какое время нужно задержать объемы воды, чтобы ущербы были минимальны.

Эти работы выполняются в настоящее время на кафедре гидротехнического и энергетического строительства Белорусского национального технического университета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Круглов, Г.Г., Линкевич, Н.Н. Опыт натурных обследований гидротехнических сооружений неэнергетического назначения и малых ГЭС с целью их восстановления // Строительная наука и техника. – 2008. – № 6. – С. 92-94.
2. Национальная система мониторинга окружающей среды республики Беларусь: результаты наблюдений. – 2006. – Минск: Бел. НИЦ «Экология», 2007. – 350 с.

3. Никифоровская, В.С. О численных моделях неустановившихся течений в руслах с поймами // *Динамика сплошной среды* – 1978, вып. 35. – С. 89-98

4. Изменение климата и последствия. – Под общ. ред. акад. В.Ф Логинова. – Минск: ОДО "Тонпик", 2003. – 330 с.

5. Рогунович, В.П. Расчет водного режима систем водотоков. Всес. симпозиум "Численные методы в гидравлике", г.Телави, 14.04.1980-18.04 1980. – Л.: 1980. – С. 54-57.

6. Рогунович, В.П. Автоматизация математического моделирования движения воды и примесей в системах водотоков. – Л.: Гидрометеоздат, 1989-264 с.

7. Рогунович В.П. Потепление и экстремальные природные явления в гидросфере Беларуси. // *Природные ресурсы*. – 2009. – № 1. – С. 78 –84.

8. Рогунович, В.П. Средства для эффективного обустройства бассейнов рек. // *Природопользование*. – 2009. – № 15. – С. 88-94.

9. Рогунович В.П., Варфоломеев В.А., Евдокимов В.А. Измерение параметров нестационарных процессов. // *Метрология и приборостроение*. – 2009.-№1. – С. 23-26.

10. Рогунович, В.П., Евдокимов, В.А., Лютко, Г.П., Микулович, В.И., Шнитко, В.Т, Варфоломеев, Ю.А. Автоматическая измерительная информационная система для исследования разрывных и плавно изменяющихся течений. // *Вестник БНТУ*. – 2009. – №4. – С. 8-12.

11. Рутковский, П.П. Проблема наводнений в Республике Беларусь и пути ее решения / П.П. Рутковский // *Природные ресурсы*. – 2001. – № 1. – С. 59–63.