

УДК 532.628:614.84

канд. физ.-мат. наук Вереме́нюк В.В., д-р техн. наук Ивашечкин В.В.,
Семенова Я.А., Немеровец О.В.

**Приближенная методика расчета затопления поймы реки
при экстремальных попусках из водохранилища
в период половодья**

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Проведена оценка опасности затопления поймы водохранилища. Рассмотрено гидродинамическое моделирование параметров течения водохранилища при пропуске расходов половодья, основанное на использовании географических отметок речной долины и уровней воды в реке. Получено решение этого расчета на ЭВМ, позволяющее сделать прогноз глубины течения в русле с учетом поймы. С помощью созданной компьютерной программы полученные результаты дают возможность использования данной методики для определения распространения волны паводка при пропуске половодья. Предложена методика расчета затопления поймы в реке при пропуске половодья.

Ключевые слова: водохранилище, гидродинамическое моделирование, пропуск расхода половодья, затопление поймы

**Ph.D. (Phys. and Math.), assoc. prof. V.V. Veremenyuk, Dr (Tech.), prof.
U.V. Ivashechkin, Y.A. Siamionava, O.V. Nemerovets**

**Approximate methodology for calculating the floodplain flooding
during the extreme releases from the reservoir during the flood
period**

Belarusian National Technical University, Minsk

The danger of flooding floodplains of the reservoir is conducted. The hydrodynamic modeling of the flow parameters of the v-storage is considered when flow of floods is missed, based on the use of geographical marks of the river valley and water levels in the river. We obtained a solution of this calculation on a computer, which makes it possible to make a forecast of the depth of the current in the channel, taking into account the floodplain. With the help of the created computer program, the obtained results make it possible to use this technique to determine the propagation of a flood wave during the passage of high water. A method for calculating floodplain flooding in a river during flood flooding is proposed.

Keywords: reservoir, hydrodynamic modeling, skipping flood flow, flooding floodplain

Введение

В последние годы увеличивается количество чрезвычайных ситуаций, которые приводят к значительному ухудшению качества земель и ущербу населенным пунктам. Наводнения являются одним из

часто повторяющихся стихийных бедствий, охватывающих большие территории и превосходящих по наносимому ущербу многие другие чрезвычайные ситуации. Несмотря на это, до сих пор нет надежных долгосрочных прогнозов их

появления, достоверных и общепринятых методик подсчета причиняемых ими ущербов. Анализ данных по наводнениям позволяет сделать вывод о тенденциях роста причиняемого ими ущерба.

Среди основных причин, приводящих к большим ущербам от половодий, можно назвать отсутствие достоверных прогнозов опасности затопления территорий, а также законодательно закрепленных правил хозяйственного использования земель, подверженных сезонным затоплениям.

Учитывая обширность речных пойм и быстроту протекающих на них процессов затопления, в работе [1] рекомендовано использовать методы дистанционного зондирования Земли из космоса. Важными преимуществами этих методов являются большая обзорность, возможность регулярного отслеживания состояния земной поверхности, высокая оперативность получения информации об интересующем районе и интеграция в геоинформационные системы (ГИС).

Автором работы [1] предложена методика моделирования затопления территории по космическим снимкам высокого пространственного разрешения в сочетании с данными об уровнях воды, определяемых на гидропостах. Методика состоит из трех последовательных этапов: I этап – формирование базы данных космических снимков территорий, включающий анализ развития половодий и водного режима рек, составление графиков максимальных уровней для гидропостов, расчет обеспеченности уровней воды, выявление периодов стояния высоких

вод с целью заказа архивных космических снимков на даты максимального разлива вод, анализ архивов поставщиков данных дистанционного зондирования Земли, обработка космических снимков в специализированном программном обеспечении; II этап – создание геоинформационной базы данных зон затопления; III этап – моделирование затопления территории с составлением карты затопления территории при различных уровнях обеспеченности. Но геоинформационная база данных затопления территорий, полученная по космическим снимкам, имеет значительный недостаток – ограниченное число моделей затопления, которое зависит от наличия космических снимков территории при различных уровнях воды.

В работе [2] предложена методика исследования опасности затопления территории, наиболее подходящая для локального масштаба. На основе статистического анализа вычислены максимальные уровни половодья р. Обь малой обеспеченности в г. Барнауле. Методом картографического моделирования определены границы зон затопления при наводнениях с максимальными уровнями воды разной расчетной обеспеченности. Проведенные расчеты проверены с помощью метода реального года на примере половодья 2010 г. В результате исследования получена оценка исследуемой территории по степени опасности затопления, социального и экономического риска наводнений.

Заслуживают интереса методы расчета зон затопления в речной долине путем применения метода

численного гидродинамического моделирования, которые позволяют рассчитать величину зоны затопления территории, прилегающей к реке, и время, на которое эта территория оказывается затопленной. На основе этого метода оценивается распространение паводковых и прорывных волн и проводится расчет зон затопления в речной долине. Для восстановления разрушенных земель требуются огромные затраты, которые намного превышают средства, требуемые для проведения противопаводковых мероприятий. Наиболее распространенными способами защиты от затопления является строительство дамб или создание польдерных систем. Ввиду значительной протяженности объектов защиты для определения параметров защитных сооружений перспективно применение численного гидродинамического моделирования.

В работе [3] рассмотрена упрощенная методика моделирования распространения волн прорыва и паводковых волн для обеспечения защиты земель от наводнения. Показано, что моделирование паводковых и прорывных волн можно проводить по спутниковым данным о рельефе и гидрологическим характеристикам водного объекта, не прибегая к дополнительным изысканиям, при этом будут получены достоверные результаты. В результате анализа влияния качества картографических материалов на результаты расчетов автором [3] установлено, что их использование возможно с шагом основных горизонталей 2–5 м. Однако такой шаг горизонталей можно использовать только для расчетов прорывных и паводковых волн

речных долин крупных рек, и он не вполне подходит для средних и малых рек.

Нами разработана программа расчета параметров течения в реке Вилия за плотиной Вилейского водохранилища [4]. Учет затопления поймы в данной программе проводился достаточно грубо: меженное (коренное) русло принималось прямоугольного поперечного сечения с постоянной высотой берегов, равной 2,8 м, пойма также принималась постоянной ширины, равной 650 м. Во многом эти допущения были продиктованы отсутствием достоверных данных об устройстве речной долины на расчетном участке. Процедура учета этих данных описана в [4, 5] и реализована в программе на ЭВМ.

Для более точного расчета затопляемых участков поймы в данной работе использовались данные по географическим отметкам речной долины и уровней воды в реке, полученные для 4-х створов, находящихся на расстоянии 330, 4330, 5630 и 9360 метров соответственно от плотины Вилейского водохранилища. Расчеты, представленные ниже, производились на участке реки длиной 10 км ниже водосброса плотины при пропуске расхода половодья 0,1 % – обеспеченности.

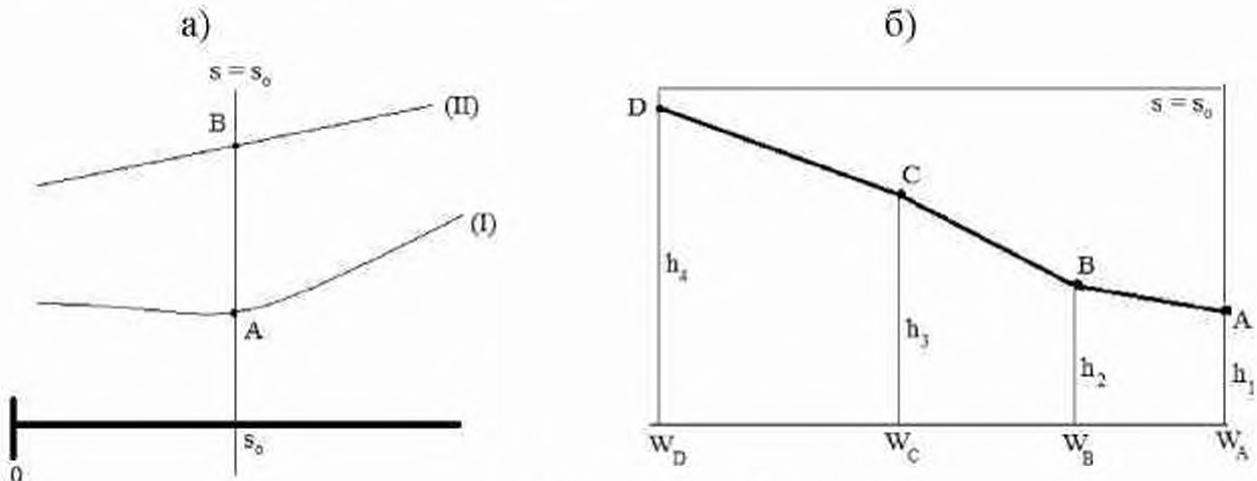
Основная часть

Для организации вычислений параметров течения реки с учетом поймы с использованием методики [4, 5] предполагается, что поверхность речной долины в районе поймы является кусочно-цилиндрической, а именно: берег можно разбить на участки линиями

равных отметок высоты относительно дна реки (назовем их горизонталями). На каждом из этих участков берег является цилиндрической поверхностью, направляющими линиями которой служат ограничивающие этот участок горизонтали, а образующие – это прямые, соединяющие те точки горизонталей, которые лежат в плоскости $s = s_0$, где здесь и далее параметр s – расстояние вдоль реки от точки русла до плотины (эта плоскость перпендикулярна руслу реки и находится на расстоянии s_0 от плотины). Вышесказанное предположение поясняется ниже на рисунках 1 и 2. В предлагаемой работе горизонтали брались ломаными, что опять же связано с недостатком исходной

информации о поверхности речной долины.

На рисунке 1, а показан план участка речной долины, где плоскость $s = s_0$ пересекает горизонтали (I) и (II) в точках A и B соответственно. Следовательно, отрезок AB считается образующей береговой поверхности на этом участке (т.е. между горизонталями (I) и (II)). На рисунке 1, б показано, как выглядит сечение береговой поверхности плоскостью $s = s_0$. Здесь h_1, h_2, h_3, h_4 – высоты относительно дна реки точек A, B, C и D соответственно, а W_A, W_B, W_C, W_D – расстояния этих точек до русла реки.



а – план; б – поперечный разрез

Рисунок 1 – Схема участка речной долины

Такое предположение не противоречит обычному устройству речных долин в республике, хотя и вносит определенные погрешности в вычисления. При этом эта погрешность будет уменьшаться при увеличении количества заданных створов и числа горизонталей.

Для учета затопления поймы

при движении потока в прямоугольном русле шириной b в случае больших расходов по рекомендации из [5] в системе Сен-Венана в [4] второе уравнение системы заменяется на уравнение $\frac{B}{b} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hV)}{\partial s} = 0$, где h и V – соответственно глубина и скорость потока на расстоянии s

от плотины, $B = b + B_0$ – полная ширина потока, включающая транзитную часть потока b (русло) и его не транзитную часть B_0 (затопленную пойму).

Для определения ширины B_0 при использовании указанной выше модели устройства поверхности

берега на пойме реки поступаем, как показано на рисунке 2: если глубина в русле $h(t, s) > h_3$, то $B_0 = W_C + W_s$.

Поперечные разрезы р. Виляя на различных расстояниях от плотины Вилейского водохранилища представлены на рисунке 3.

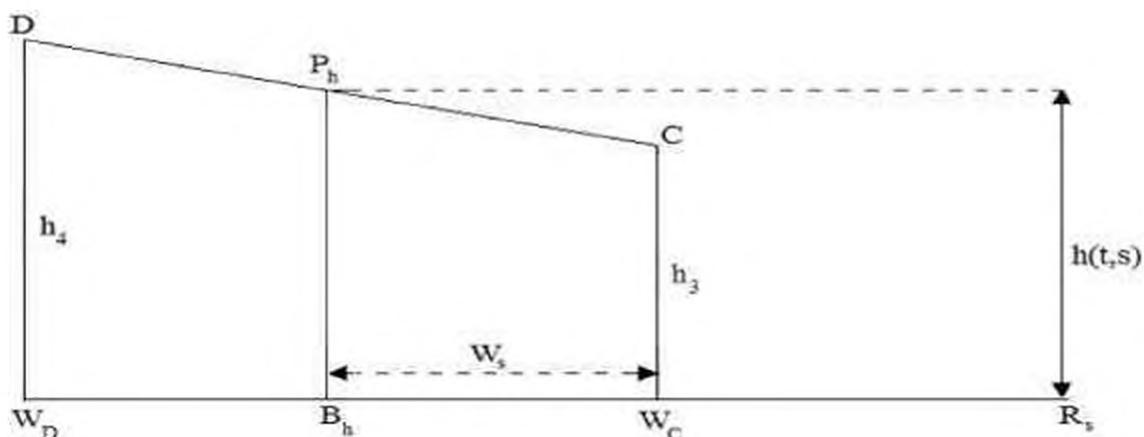
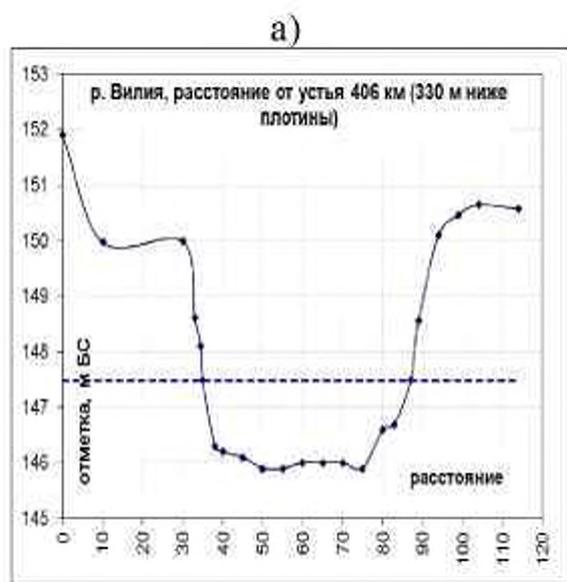


Рисунок 2 – Схема к расчету ширины затопленной поймы B_0



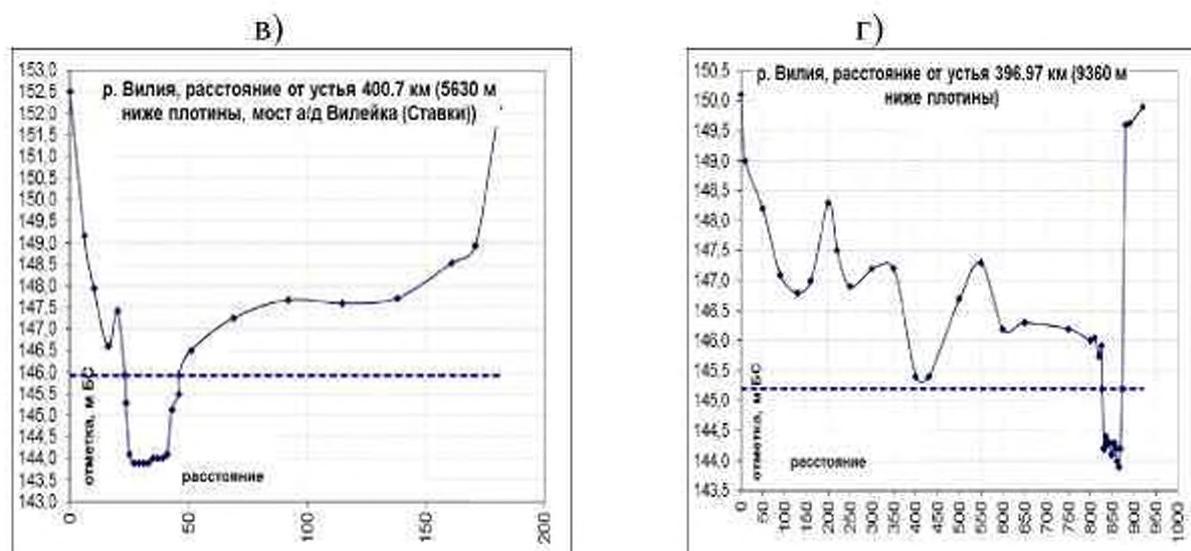


Рисунок 3 – Поперечные разрезы речной долины р. Виляя на различных расстояниях от плотины Вилейского водохранилища:
а – 330 м; б – 4330 м; в – 5630 м; г – 9360 м

Структурирование исходных данных по пойме

Для подготовки этих данных к использованию в программе расчета течения в русле с учетом поймы используем изложенное выше предположение о структуре берега

и линейную интерполяцию и строим схему берега. На рисунке 4 представлена расчетная схема плана участка речной долины для левого берега.

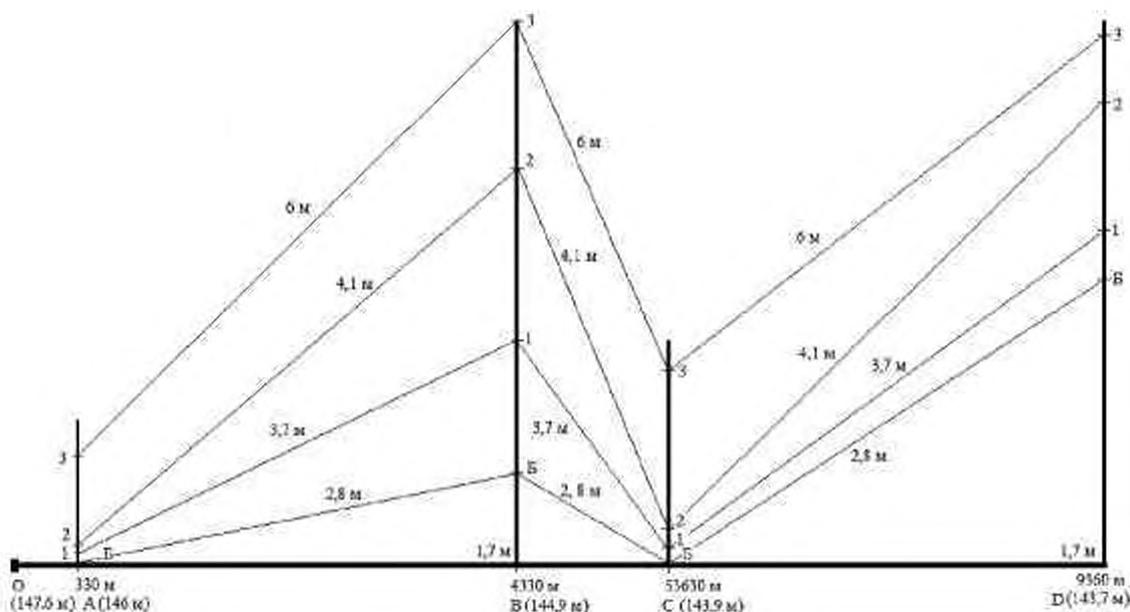


Рисунок 4 – Расчетная схема плана участка речной долины для левого берега

На этой схеме точки *A*, *B*, *C* и *D* – створы, для которых выполнены измерения, точка *O* – створ водохранилища. В скобках указаны

отметки глубины дна (относительно Балтийской системы). Ниже указаны расстояния до створа водохранилища – точки *O*. Для точек *B* и *D*

указаны высоты берегов относительно дна – это 1,7 м (низкий берег). Для точек *A* и *C* эти отметки – 2, 8 м (высокий берег). Проведены 4 ломаных горизонтали для высот 2,8; 3,7; 4,1 и 6 м, разбившие берег на 4 участка цилиндрических поверхностей (как это было описано в начале основной части). Точки Б, 1, 2 и 3 на вертикальных осях соот-

ветствуют расстояниям от реки: для створа *A* – это 0, 4, 5 и 35 м соответственно; для створа *B* – 25, 90, 570 и 990 м; для створа *C* – 0, 6, 12 и 70 м, для створа *D* – 265, 280, 650 и 800 м.

На рисунке 5 представлена аналогичная расчетная схема плана речной долины для правого берега.

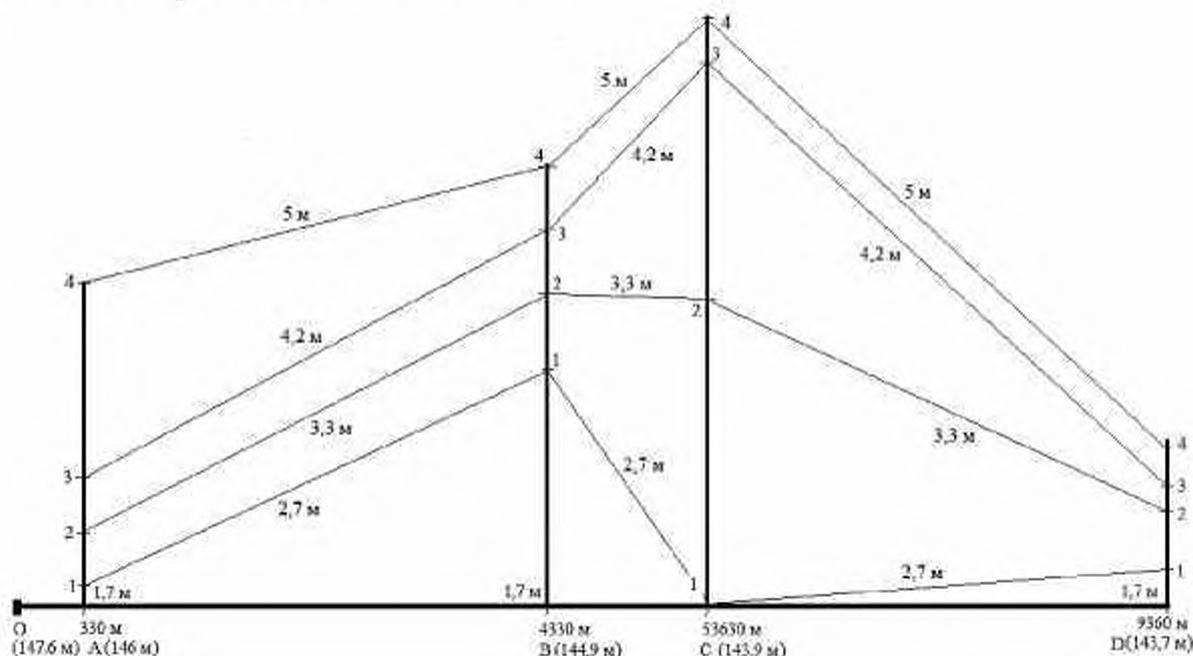


Рисунок 5 – Расчетная схема плана участка речной долины для правого берега

Точки 1, 2, 3 и 4 на вертикальных осях соответствуют расстояниям от реки: для створа *A* – 2, 5, 8 и 20 м соответственно; для створа *B* – 15, 19, 22 и 25 м; для створа *C* – 0, 18, 100 и 122 м, для створа *D* – 3, 8, 10 и 20 м.

Результаты расчетов затопленной поймы при пропуске расхода паводья 0,1 % – обеспеченности

Ниже приведены численные и графические данные расчетов течения на участке 10 км ниже плотины с учетом данных рельефа речной долины. Исходные данные следующие:

- максимальный расход паводка $Q_{\max} = 1558,6 \text{ м}^3/\text{с}$, время $t_n = T_{\text{rise}} = 7,8$ дней – время, в течение которого происходит нарастание расхода паводка, общее время паводка $T_{\max} = 7,8$ дней (эти данные рассчитаны в [6]);

- расход воды через водосливную плотину до начала паводка $Q_0 = 77,9 \text{ м}^3/\text{с}$, используемый в энергетике расход $Q_u \equiv \text{const} = 26 \text{ м}^3/\text{с}$.

Усредненные параметры реки: уклон русла $i = 0,0004$, ширина русла $b = 50$ м (значения i и b рассчитаны по данным, указанным на рисунках 3 и 4), шероховатость

русла принята $n = 0,025$ [табл. 7, 4].

Разностная схема для расчета описана подробно в [4].

Ниже представлены графики глубины $H(t)$ течения в русле (рисунок 6), ширины затопленной поймы левого берега в зависимости от времени $W(t)$ в районе заданных створов

и от расстояния до плотины $W(s)$ для определенных временных значений (рисунки 7 и 8 соответственно). Чтобы не загромождать изложение, мы не приводим данные по затоплению правого берега, т.к. оно незначительно по сравнению с левым берегом.

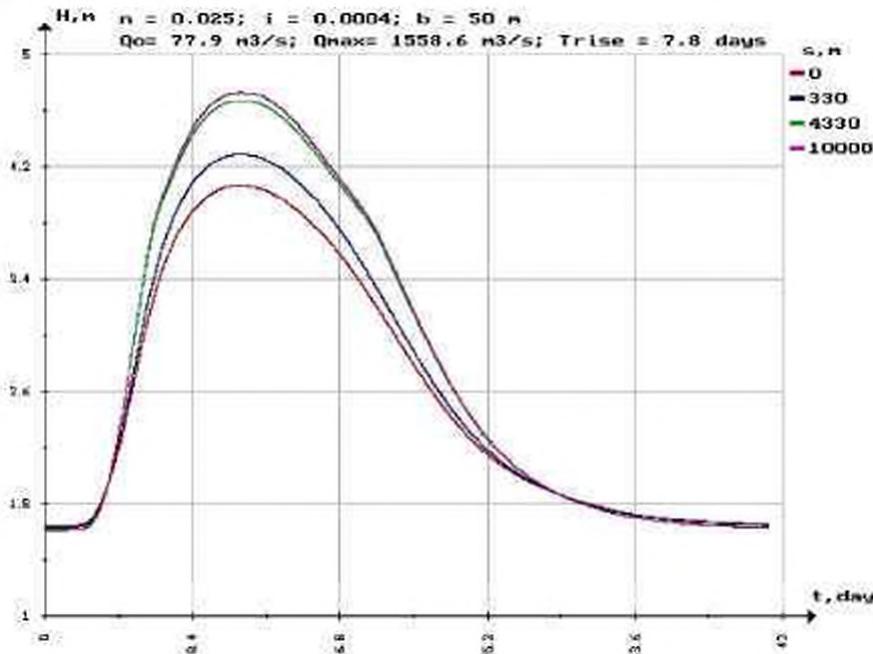


Рисунок 6 – Глубина течения $H(t)$ в метрах

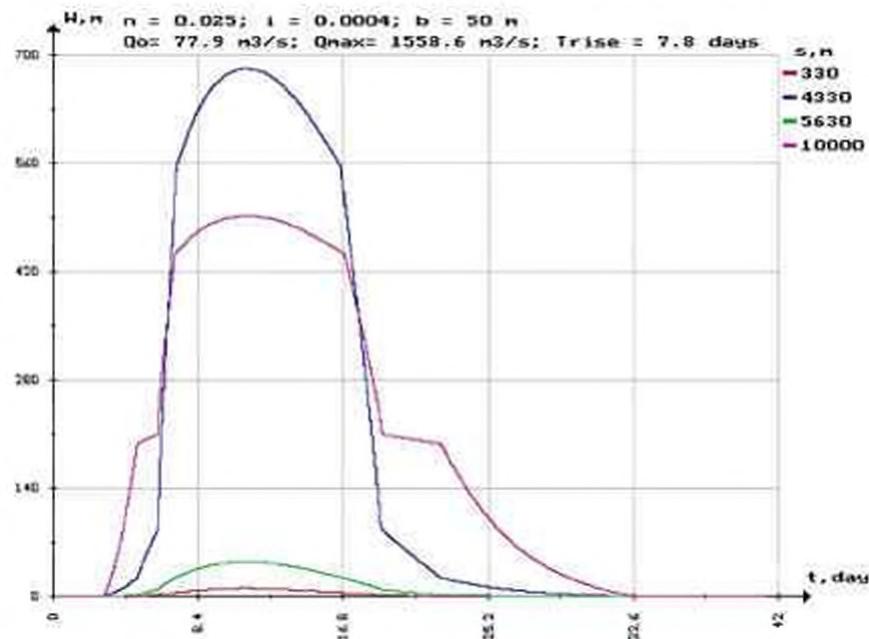


Рисунок 7 – Ширина затопления левой поймы в районе заданных створов в зависимости от времени

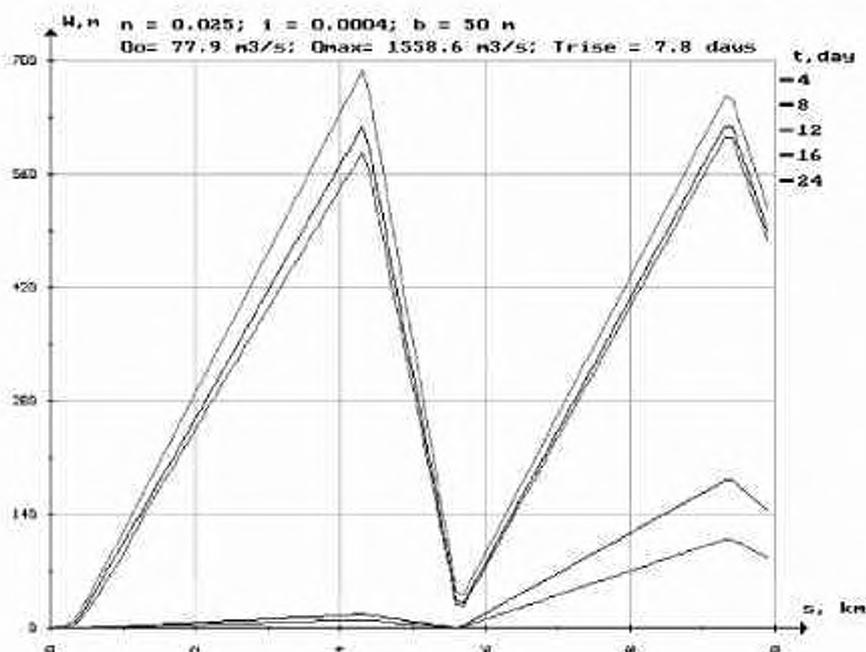


Рисунок 8 – Ширина затопления левой поймы в зависимости от расстояния s до плотины в определенные моменты времени

Рисунки 6-8 показывают, что наибольшие проблемы с затоплением на левом берегу возникают в промежутки времени от 6-х до 16-х суток от начала наводнения. Причем на 22-е сутки этих проблем практически нет (только в районе 9-го км на левом берегу). При этом максимальное затопление на левом берегу происходит в районе 4,5-го километра, причем, как видно из рисунков 3, 4 и 6, глубина затопления достигает 2,5 м недалеко от берега и 1-1,5 м на расстоянии от 90 до 600 м от берега.

Выводы

1. Разработана и апробирована методика расчета затопления поймы реки ниже плотины водохранилища при пропуске половодья, которая позволяет оценить размеры зоны затопления поймы, глубины и время стояния паводковых вод. Исходными данными являются поперечные разрезы речной долины реки на различных расстояниях от плотины

водохранилища при прохождении паводка и гидродинамические параметры потока на выходе из плотины водохранилища.

2. Разработан алгоритм, создана компьютерная программа для оперативного моделирования распространения волны паводка.

ЛИТЕРАТУРА

- Тарарин, А.М. Космический мониторинг и оценка риска затопления урбанизированных территорий в периоды половодий: автореф. дис. канд. техн. наук: 25.00.36 / А.М. Тарарин. – Москва, 2013. – 23 с.
- Голубева, А.Б. Оценка опасности и рисков наводнений в г. Барнауле (пос. Затон) / А.Б. Голубева, В.А. Земцов // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – № 373. – С. 36-41.
- Степанов, К.А. Моделирование паводковых и прорывных волн для обоснования мероприятий по защите сельскохозяйственных земель от затопления: автореф. дис.

канд. техн. наук: 06.01.02 / К.А. Степанов. – Москва, 2013. – 20 с.

4. Верременюк, В.В. Расчет параметров волны половодья в реке ниже водохранилища. / В.В. Верременюк, В.В. Ивашечкин // Мелиорация. – 2016. – С. 26-31.

5. Рогунович, В.П. Расчет водного режима систем водотоков / В.П. Рогунович // Численные методы в гидравлике: тезисы доклада Всесоюзного симпозиума. – Телави, 1980. – С. 54-57.

6. Прогноз уровней в Вилейском водохранилище при пропуске расходов половодья / В.В. Ивашечкин [и др.] // Вестник БрГТУ. – 2017. – С.17-21.

7. Мелиоративные системы и сооружения. Приложение 14 : СНиП 2.06.03-85 ; введ. 01.07.1986. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 47 с.

