

УДК 532.628:614.84

## ПРИБЛИЖЕННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЗАТОПЛЕНИЯ ПОЙМЫ РЕКИ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПОПУСКАХ ИЗ ВОДОХРАНИЛИЩА В ПЕРИОД ПОЛОВОДЬЯ

Верременюк В.В., Ивашечкин В.В., Семенова Я.А., Немеровец О.В.

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. Проведенное с помощью специально созданной компьютерной программы моделирование позволяет сделать прогноз глубины течения в русле с учетом поймы. 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.

(Поступила в редакцию 10 ноября 2017 г.)

**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 сего времени нет надежных долгосрочных прогнозов их возникновения, достоверных и общепринятых методик подсчета причиняемого ими ущерба. Анализ данных по наводнениям позволяет сделать вывод о тенденциях роста такого ущерба.

Среди основных причин, приводящих к большим ущербам от половодий, можно назвать отсутствие достоверных прогнозов опасности затопления территорий, отсутствие 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 территории, 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 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 являются 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 была разработана программа расчета параметров течения в реке Вилия за плотиной Вилейского водохранилища [4]. Учет затопления поймы в нашей программе производился 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 компьютерной программе.

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 от плотины Вилейского водохранилища на расстоянии 330, 4330, 5630 и 9360 метров соответственно. 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 участок горизонтали, а образующие – это прямые, соединяющие те точки горизонталей, которые лежат в плоскости  $s = s_0$ , 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 1а 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 1б показано, как выглядит сечение береговой поверхности плоскостью  $s = s_0$ . Здесь  $h_1, h_2, h_3, h_4$  – высоты расположения относительно дна реки точек  $A, B, C$  и  $D$  соответственно, а  $W_A, W_B, W_C, W_D$  – расстояния от этих точек до русла реки.

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

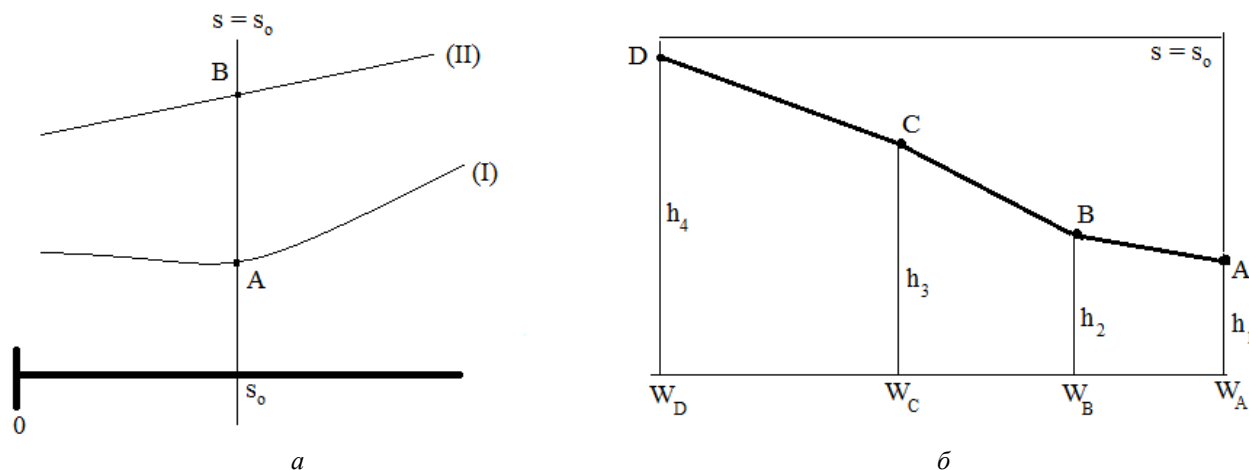


Рисунок 1. – Схема участка речной долины: *a* – план; *б* – поперечный разрез

Для учета затопления поймы при движении потока в прямоугольном русле шириной  $b$  в случае паводка и поступления в русло больших расходов воды из водохранилища по рекомендации из [5] в системе Сен-Венана в [4] второе уравнение системы (уравнение неразрывности) 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 нетранзитную 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 на расстоянии  $s = s_0$  глубина в русле  $h(t, s_0) > h_3$ , то  $B_0 = W_C + W_s$ . На рисунке 2 изображено сечение береговой поверхности плоскостью  $s = s_0$ :  $R_s$  – соответствующая точка берега русла,  $P_h$  – точка речной долины с высотой относительно дна, равной глубине  $h(t, s_0)$ .

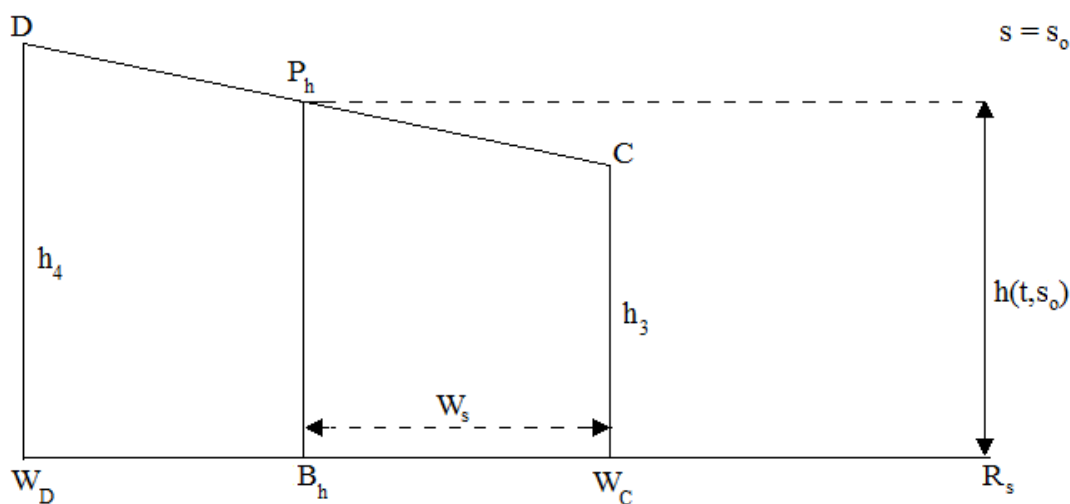


Рисунок 2. – Схема к расчету ширины затопленной поймы  $B_0$

Поперечные разрезы речной долины р. Вилия на различных расстояниях от плотины Вилейского водохранилища представлены на рисунке 3.

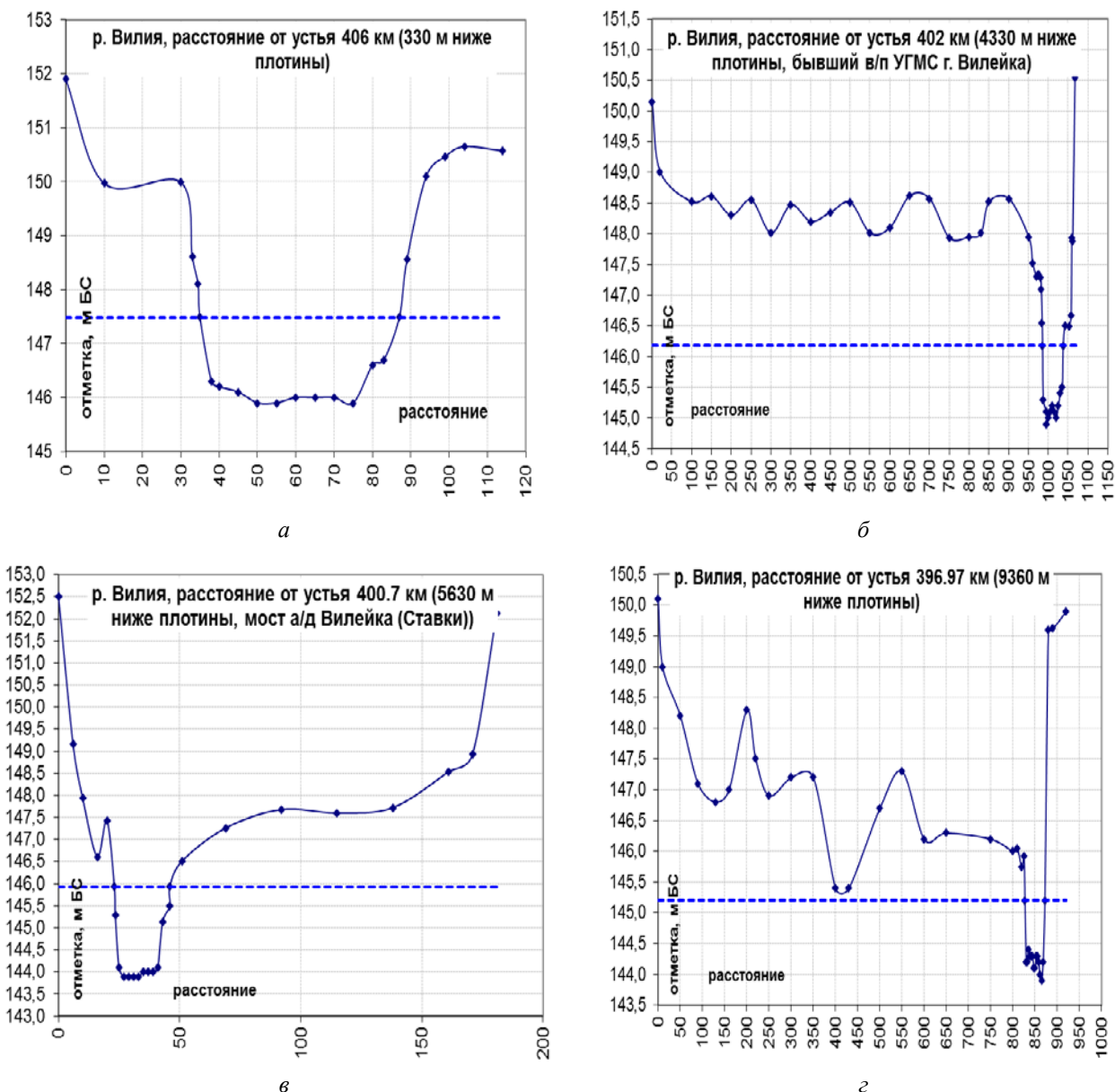


Рисунок 3. – Поперечные разрезы речной долины р. Виляя на различных расстояниях от плотины Вилейского водохранилища: а – 330 м; б – 4330 м; в – 5630 м; г – 9360 м

**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.

На этой схеме точки *A*, *B*, *C* и *D* – створы, для которых выполнены измерения, точка *O* – створ водохранилища. Для каждой из этих точек в скобках указаны отметки глубины дна (относительно Балтийской системы). Ниже горизонтальной оси указаны расстояния от этих точек до створа водохранилища – точки *O*. Для точек *B* и *D* над горизонтальной осью 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 *B*, *1*, *2* и *3* на вертикальных осях соответствуют расстояниям от реки: для створа *A* – это 0, 4, 5 и 35 метров соответственно; для створа *B* – это 25, 90, 570 и 990 метров; для створа *C* – это 0, 6, 12 и 70 метров, для створа *D* – это 265, 280, 650 и 800 метров.

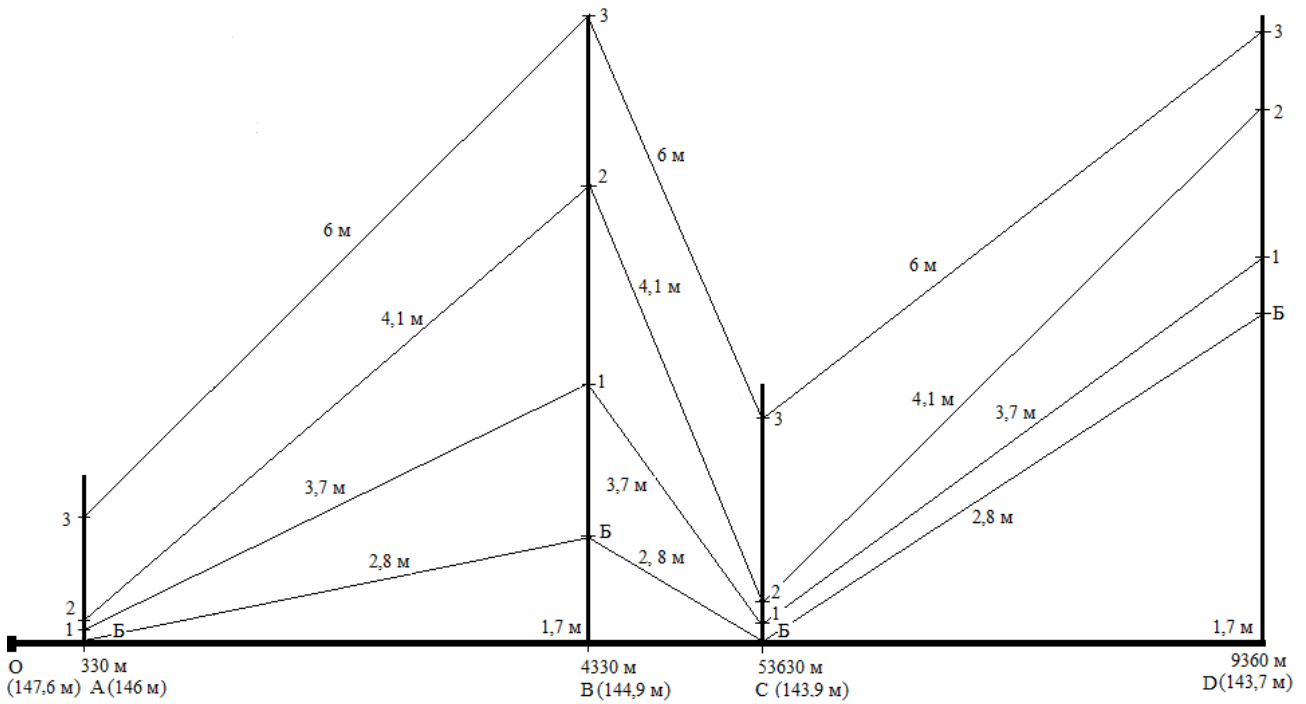


Рисунок 4. – Расчетная схема плана участка речной долины для левого берега

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

Точки 1, 2, 3 и 4 на вертикальных осях соответствуют расстояниям от реки: для створа А – это 2, 5, 8 и 20 метров соответственно; для створа В – это 15, 19, 22 и 25 метров; для створа С – это 0, 18, 100 и 122 метров, для створа D – это 3, 8, 10 и 20 метров.

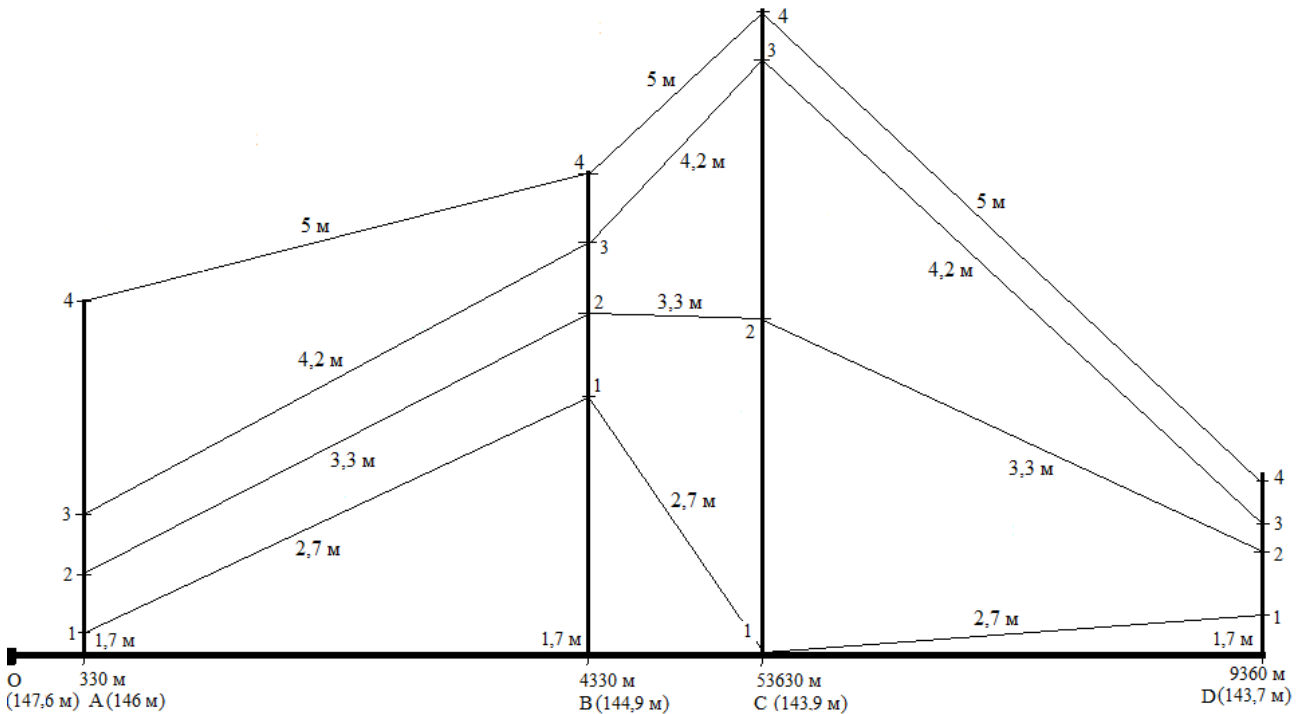


Рисунок 5. – Расчетная схема плана участка речной долины для правого берега

**Результаты расчетов затопленной поймы при пропуске расхода половодья 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  $b = 50 \text{ м}$  (значения  $i$  и  $b$  рассчитаны по данным, указанным на рисунках 3 и 4), шероховатость русла принята  $n = 0,025$  [7, таблица 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 в зависимости 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.

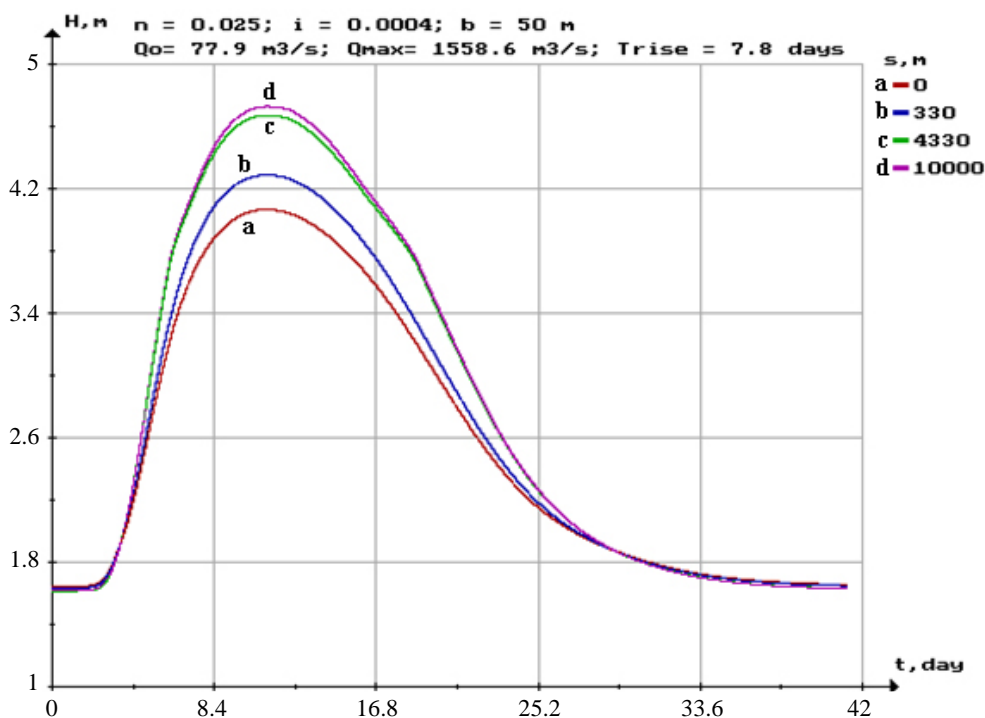


Рисунок 6. – Глубина течения  $H(t)$  в метрах

Рисунки 6–8 показывают, что наибольшая опасность затопления левого берега наступает в промежуток времени от 6-х до 16-х суток от начала наводнения. Причем на 22-е сутки опасность затопления не значительна и может возникнуть 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.

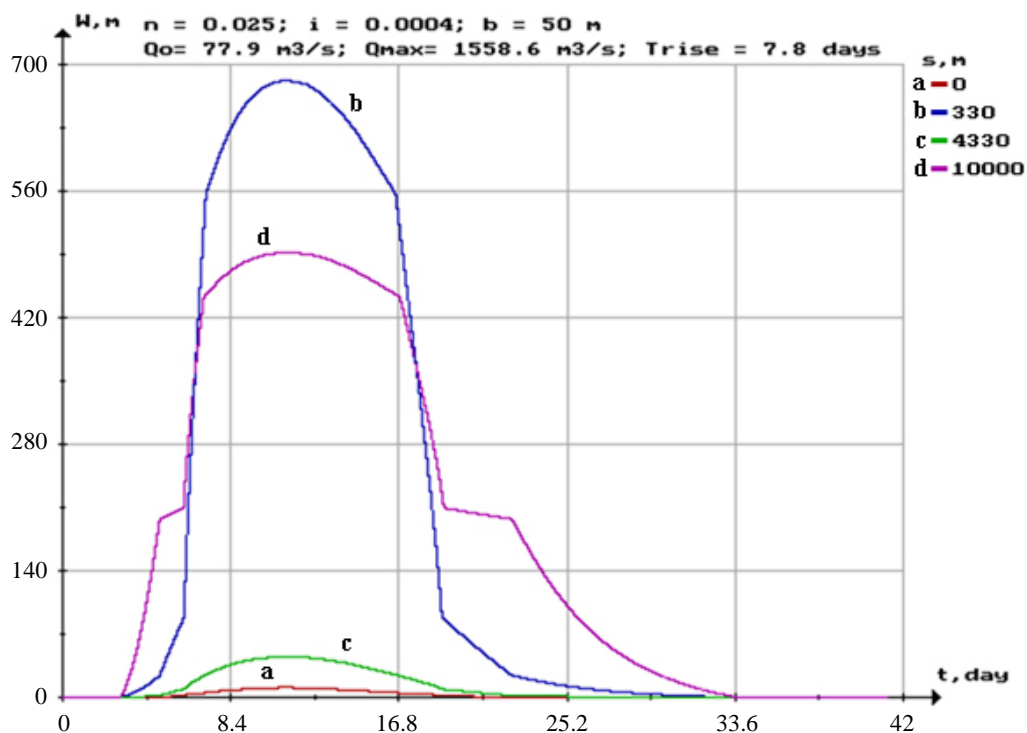


Рисунок 7. – Ширина затопления левой поймы в районе заданных створов в зависимости от времени

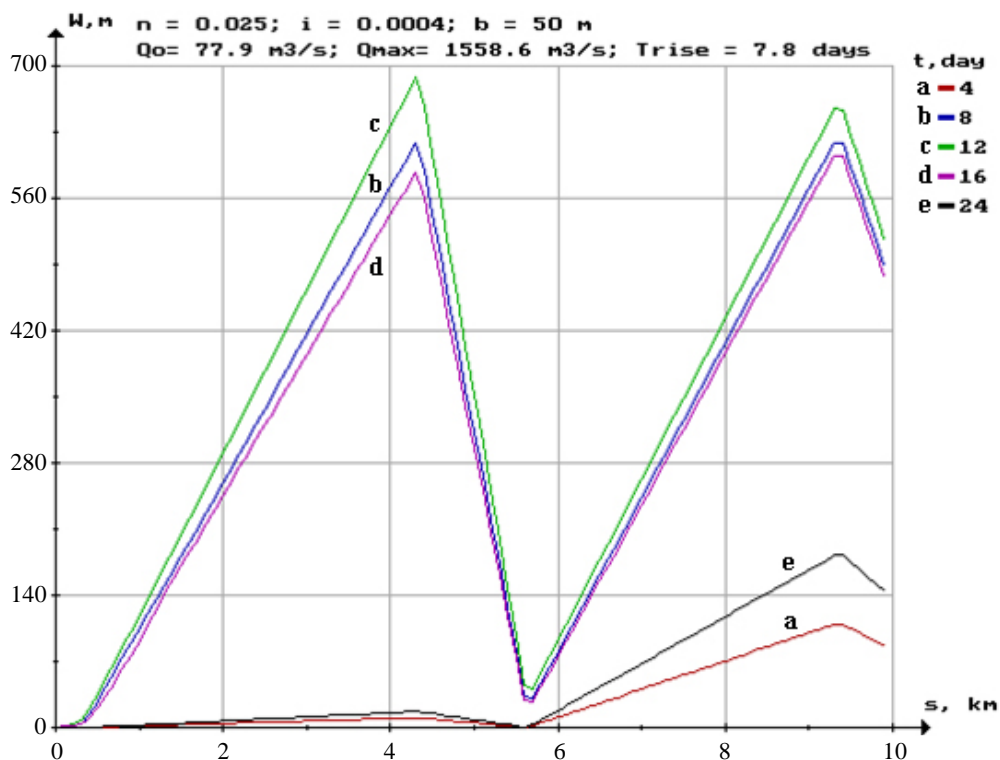


Рисунок 8. – Ширина затопления левой поймы в зависимости от расстояния  $s$  до плотины в определенные моменты времени

**Выводы.** Разработана и апробирована методика расчета затопления поймы реки ниже плотины водохранилища при пропуске половодья, которая позволяет оценить размеры зоны затопления поймы, глубину 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.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тарарин, А.М. Космический мониторинг и оценка риска затопления урбанизированных территорий в периоды половодий: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 25.00.36 / А.М. Тарарин. – М., 2013. – 23 с.
2. Голубева, А.Б. Оценка опасности и рисков наводнений в г. Барнауле (пос. Затон) / А.Б. Голубева, В.А. Земцов // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – Вып. № 373. – С. 36–41.
3. 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. – М., 2013. – 20 с.
4. Веремнюк, В.В. Расчет параметров волны половодья в реке ниже водохранилища / В.В. Веремнюк, 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. Ивашечкин, В.В. Прогноз уровней в Вилейском водохранилище при пропуске расходов половодья / В.В. Ивашечкин, В.В. Веремнюк, Г.Г. Круглов, Я.Я. Анацко, Я.А. Солдатенко // Вестник БрГТУ. – 2017. – № 2 (104): Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 57–61.
7. Мелиоративные системы и сооружения: Приложение 14 к СНиП 2.06.03-85. – Введ. 07.01.1986. – М.: Госстрой СССР, 1986. – 59 с.



## APPROXIMATE METHOD OF CALCULATION OF INUNDATION OF RIVER VALLEY AT EXTREME RELEASES FROM WATER RESERVOIR IN THE PERIOD OF THE HIGH WATER

**Valentin Veremenyuk**, PhD in Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor

**Uladimir Ivashechkin**, Grand PhD in Technical Sciences, Professor

**Yana Siamionava**

**Olga Nemerovets**

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Purpose.* The work assesses the danger of inundation of river bottom land. It is necessary to estimate a danger of water flow over the top of earth dam in the period of high water.

*Methods.* The hydrodynamic modeling of flow parameters of the water reservoir is considered based on the use of geographical marks of the river bottom land and water levels in the river.

*Findings.* The simulation carried out with the help of the created computer program allows to make a forecast of the depth of the stream in the riverbed taking into account the floodplain.

*Application field of research.* The results obtained make it possible to use this technique to determine the propagation of a flood wave during the passage of high water.

*Conclusions.* A new method for calculating the bottom land flooding of the river is suggested, while flooding.

*Keywords:* water reservoir, hydrodynamic modeling, skipping flood flow, flooding of river bottom land.

(The date of submitting: November 10, 2017)

### REFERENCES

1. Tararin A.M. *Kosmicheskiy monitoring i otsenka riska zatopleniya urbanizirovannykh territoriy v periody polovodiy* [Space monitoring and assessment of the risk of flooding of urbanized areas during periods of floods]. PhD tech. sci. diss. synopsis.: 25.00.36. Moscow, 2013. 23 p. (rus)
2. Golubeva A.B., Zemtsov V.A. Otsenka opasnosti i riskov navodneniy v g. Barnaule (pos. Zaton) [Flood hazard and risk assessment in Barnaul (Zaton settlement)]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013. Issue 373. 36–41 p. (rus)
3. Stepanov K.A. *Modelirovanie pavodkovykh i proryvnykh voln dlya obosnovaniya meropriyatiy po zashchite sel'skokhozyaystvennykh zemel' ot zatopleniya* [Simulation of flood and breakthrough waves for justification of measures to protect agricultural lands from flooding]. PhD tech. sci. diss. synopsis: 06.01.02. Moscow, 2013. 20 p. (rus)
4. Veremenyuk V.V., Ivashechkin V.V. Raschet parametrov volny polovod'ya v reke nizhe vodokhranilishcha [Calculation of the flood wave in the river below the reservoir]. *Melioratsiya*, 2016. 26–31 p. (rus)
5. Rogunovich V.P. Raschet vodnogo rezhima sistem vodotokov [Calculation of the water regime of watercourse systems. Numerical methods in hydraulics]. *Chislennyye metody v gidravlike: theses of the report of the All-Union Symposium*. Telavi, 1980. Pp. 54–57. (rus)
6. Ivashechkin V.V., Veremenyuk V.V., Kruglov G.G., Anatsko Ya.Ya., Soldatenko Ya.A. Prognoz urovney v Vileyskom vodokhranilishche pri propuske raskhodov polovod'ya [Forecast of the levels in the Vileyskoye reservoir at the time of flow of floods]. *Vestnik BrGTU*, 2017. No. 2: Vodokhozyaystvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geokologiya. Pp. 17–21. (rus)
7. *Meliorativnyye sistemy i sooruzheniya* [Melioration systems and structures]: Appendix 14 to SNiP 2.06.03-85. Implemented on 07/01/1986. Moscow: Gosstroy USSR, 1986. 59 p. (rus)