

В.А.Иванов, И.А.Овчаренко, А.В.Прусов

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТИВОПАВОДКОВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В БАСЕЙНЕ РЕКИ СИРЕТ

Рассмотрен сценарий развития катастрофического ливневого паводка 23 – 27 июля 2008 г. в украинской части бассейна реки Сирет, а также сценарии возможного развития того же паводка после создания в горной и равнинной частях бассейна двух емкостей, аккумулирующих часть паводкового стока. Показано, что в случае применения этих емкостей катастрофу можно было предотвратить.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *катастрофический паводок, сценарии развития, аккумулирующая емкость, река Сирет.*

Известно, что в Карпатах, где речная сеть самая густая на Украине, паводки происходят круглый год (Национальный Атлас Украины <http://www.ignau.org.ua/>). Их количество может достигать до 15 в год. При этом, один раз в несколько лет в периоды повышенной водности происходят катастрофические паводки. По сообщениям прессы [<http://www.lenta.ru/>], страшные итоги катастрофического паводка, который обрушился на регион Карпат 23 – 27 июля 2008 г., таковы: погибли или пропали без вести 38 человек, были подтоплены 1014 населенных пунктов, 45 тыс. домов, 65 тыс. га сельхозугодий. Повреждены и затоплены 780 км автомобильных дорог, 591 автомобильный и 652 пешеходных моста.

Основные факторы, ответственные за эту катастрофу, можно разбить на две группы: природные и антропогенные. Природные – это чрезмерное количество осадков, значительно превысившее водорегулирующую способность геоэкологической системы Карпат, и перенасыщенность влагой лесных массивов и почвы непосредственно перед паводком. Антропогенные факторы – отсутствие целостной системы гидротехнических сооружений, плохой уход (или отсутствие ухода) за руслами рек и потоков, дорожными сооружениями и подпорными стенками, несвоевременное проведение противоэрозионных и противооползневых мероприятий, некачественное лесохозяйственное.

Ясно, что пассивными способами защиты (дамбы, подпорные стенки) такие паводки не одолеть. Следует активней использовать регулирование водных потоков аккумулирующими емкостями, что доказано практикой их применения у нас (на реке Днестр) и за рубежом, например, в Венгрии на реке Тиса. О необходимости применения этих, так называемых, сухих емкостей, как радикальном средстве сдерживания катастрофических паводков, сказано в Государственной целевой программе комплексной противопаводковой защиты в бассейнах рек Днестр, Прут и Сирет, которая утверждена Постановлением Кабинета Министров Украины от 27 декабря 2008 г. № 1151.

Сухие емкости представляют собой временные хранилища воды, перехватывающие часть потока во время паводка и опорожняемые после его прохождения. Их можно сооружать как в горных, так и в равнинных рай-

онах. Строительство аккумулирующих емкостей – процесс дорогостоящий, сопряженный с большими гидротехническими работами. Поэтому, прежде чем начать такие работы, следует на основе физико-математического моделирования оценить, какое количество емкостей потребуется, определить их точное местоположение и гидрологические параметры (ширина, высота плотин, пропускная способность и т.п.), проанализировать экономические и экологические последствия строительства.

Обсуждение результатов. Для примера смоделируем катастрофический паводок, вызванный летним ливнем в бассейне реки Сирет (рум. *Siret*), и возможные последствия строительства там аккумулирующих емкостей.

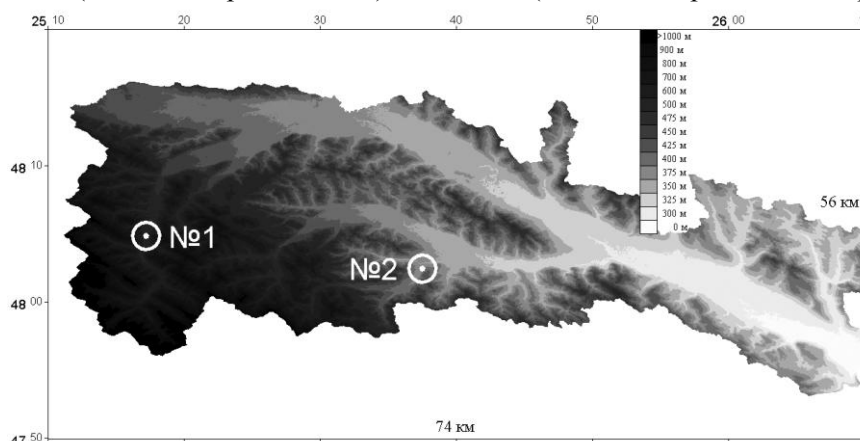
Сирет – река в Румынии и Украине, левый приток Дуная. Ее длина 726 км, площадь бассейна 44000 км², среднегодовой расход 185 м³/с. Для реки характерны весеннее половодье и летняя межень, прерываемая дождевыми паводками (именно такой паводок будет моделироваться). Верховья реки, о которых пойдет речь, находятся на территории Черновицкой области.

Рассмотрим 3 сценария:

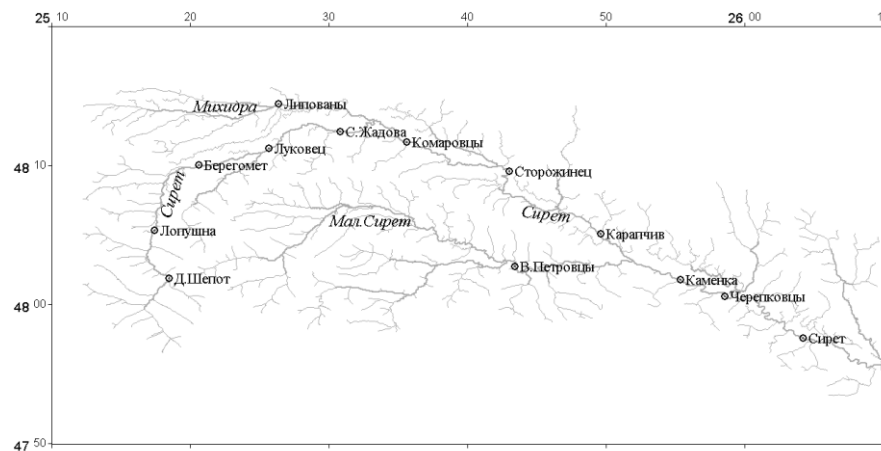
- 1) имитация катастрофического ливневого паводка 23 – 27 июля 2008 г.;
- 2) тот же паводок, но при наличии одной сухой емкости в горной части реки Сирет;
- 3) тот же паводок при наличии двух сухих емкостей: одна на реке Сирет, другая – на реке Малый Сирет.

Для оценок применим гидравлическую модель водостока [1, 2], использующую данные о возвышении земной поверхности из массива *DTED Level 1* (пространственный шаг равен 3", шаг по высоте равен 1 м [<http://edc.usgs.gov/>]).

Рассмотрим регион Украинских Карпат (рис.1) размером 74,4 × 55,8 км = 1200 × 600 ячеек (48°20' – 47°50' с.ш., 25°10' – 26°10' в.д.). Гидрографическая сеть этого региона (рис.2) довольно сложна. Кроме главных рек – Сирет, Малый Сирет, Михидра, – имеется множество малых рек, каналов, плотин, водохранилищ, дамб. Рельеф региона трансформируется от гор на западе (населенные пункты Долишний Шепот-Лопушна-Берегомет-Луковец) до плато (высотой порядка 300 м) на востоке (Каменка-Черепковцы-Сирет).



Р и с . 1 . Рельеф в украинской части бассейна реки Сирет по данным массива *DTED Level 1* (пространственный шаг равен 3", шаг по высоте 1 м). Белые окружности № 1 и 2 – места расположения аккумулирующих емкостей.



Р и с . 2 . Карта направлений водных потоков в украинской части бассейна реки Сирет.

Основа моделирования стока рек по данным о возвышении земной поверхности – определение направлений водных потоков (ключевого параметра в топографии дренажа). Проблемы при определении этих направлений обычно возникают в плоских частях региона, где малая ошибка в определении высоты места может привести к серьезному искажению истинной гидрографической сети, вплоть до направления течения не в ту сторону [2].

Мы применили описанный в [3] алгоритм автоматизированного определения направлений потоков, использующий данные о гидрографической сети региона, полученные с топографических карт масштаба 1:50000 и 1:100000. Полученные направления водных потоков показаны на рис.2. Чтобы не перегружать рисунок деталями, отмечены только те ячейки, которым соответствует площадь водосбора, большая 1 км².

В нашей модели реки, озера и болота рассматриваются как единая, непрерывная гидрографическая сеть, в которой локально возникший сток переносится по поверхности Земли реками, попадая, в конечном счете, в океан или внутреннее озеро. Входными данными являются возвышение земной поверхности, его пространственные производные, а так же данные (модельные или наблюдаемые) об атмосферных осадках, испарении, поверхностном и грунтовом стоках.

Применялась линейная модель [2], в которой перенос воды из ячейки в ячейку вычисляется по данным о направлениях потоков и коэффициентам релаксации поверхностного $T_s(x, y, t)$, подземного $T_d(x, y, t)$ и руслового $T_r(x, y, t)$ стоков.

Общий расход воды (м³/с), поступающей в каждую ячейку, состоит из суммы:

$$R_s + R_d + (P_w - E_w) + F_{in} ,$$

где R_s – сток с поверхности, R_d – подземный сток, $(P_w - E_w)$ – осадки минус испарение с поверхности воды, F_{in} – приток из вышележащих ячеек.

В каждой ячейке одновременно вычисляются изменения объемов воды в трех условных бассейнах: V_s , V_d , V_r – поверхностном, подповерхностном и речном, где суммируются потоки из соседних ячеек, плюс локальный по-

верхностный и подземный стоки, минус излишки после заполнения депрессий рельефа.

Каждой ячейке с координатами (x, y) соответствует система трех обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\frac{dV_s}{dt}(x, y, t) + \frac{1}{T_s(x, y, t)}V_s(x, y, t) = R_s(x, y, t), \quad (1)$$

$$\frac{dV_d}{dt}(x, y, t) + \frac{1}{T_d(x, y, t)}V_d(x, y, t) = R_d(x, y, t), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dV_r}{dt}(x, y, t) + \frac{1}{T_r(x, y, t)}V_r(x, y, t) = \\ = [1 - a(x, y, t)]\left[\frac{V_s}{T_s} + \frac{V_d}{T_d}\right] + a(x, y, t)[P_w(x, y, t) - E_w(x, y, t)] + F_{in}(x, y, t), \end{aligned} \quad (3)$$

Начальные условия:

$$V_s(x, y, 0) = V_{os}(x, y), \quad V_d(x, y, 0) = V_{od}(x, y), \quad V_r(x, y, 0) = V_{or}(x, y). \quad (4)$$

где $a(x, y, t)$ – доля площади поверхности ячейки, занятая водой. T_s, T_d, T_r – характерные времена релаксации поверхностного, подземного и руслового стоков, соответственно, P_w, E_w – осадки и испарение с поверхности воды, F_{in} – сумма потоков из соседних ячеек.

Кроме метеоданных, использовались данные о типах землепользования с пространственным разрешением 1 км [4]. Время $T_r(x, y, t)$ определялось как отношение расстояния $D(x, y)$ между центрами данной ячейки и ячейки, лежащей ниже по течению, к средней скорости течения $u(x, y, t)$ в данной точке. Скорость u , а значит и T_r , вычислялись по формуле Шези [5]: коэффициент T_r на каждом шаге по времени пересчитывался для каждой ячейки по формуле

$$T_r(x, y, t) = \frac{D(x, y)}{u(x, y, t)_{cp}}, \quad \text{где } u(x, y, t)_{cp} = C(x, y, t)\sqrt{R(x, y, t) \cdot i(x, y, t)}, \quad (6)$$

R – гидравлический радиус, i – уклон, C – коэффициент трения. Для его определения применялась эмпирическая формула [5]:

$$C = R^y \cdot \frac{1}{n}, \quad \text{где } y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,1). \quad (7)$$

Следуя методике [6], успешно применяемой, например, в модели SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*, <http://swatmodel.tamu.edu/>), выпавшие осадки P переводились в склоновый сток R с помощью специального эмпирического коэффициента C_n , зависящего от инфильтрационных свойств почвы, растительного покрова, количества водонепроницаемых площадей, барьеров и потенциальных хранилищ воды на поверхности (ямки, канавки и т.п.)

$$R = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S}, \quad (8)$$

где R – сток (мм), P – осадки (мм), S – влагоемкость почвы после начала

стока (мм), I_a – начальный отбор (мм). При этом

$$I_a = 0,2S, \quad R = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}, \quad S = \left(\frac{1000}{C_n} - 10\right) \cdot 25,4. \quad (9)$$

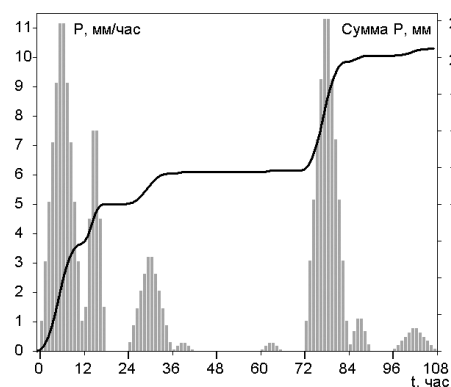
При отладке модели вместо полей атмосферных осадков использовались композитные поля среднегодовых (а также среднемесячных) величин склонового стока из [7].

«Заполнение» водой с временным шагом в 12 с продолжалось до достижения стационарного решения задачи (1) – (4), а именно, около семи модельных суток. Это время соответствует времени добегания воды от истока реки Сирет до пункта Сирет (нижний правый край на рис.2). В результате получились значения расходов, хорошо соответствующие данным многолетних наблюдений в пунктах, указанных на рис.2. Сток, полученный по среднемноголетним данным за июль (меженный сток), с некоторой натяжкой можно считать подземным стоком T_d . Таким образом, 23 июля 2008 г. паводок в рассматриваемом регионе начинался на фоне меженного стока.

Получить поле атмосферных осадков с пространственно-временным разрешением, соответствующим задаче (1) – (4), по данным сети метеопостов, конечно, нельзя. Остается либо аппроксимировать доступные данные наблюдений за осадками на более мелкую пространственно-временную сетку, либо, используя подходящую региональную модель атмосферной циркуляции, рассчитывать поля осадков с соответствующим пространственно-временным разрешением. Региональная модель, адаптированная для прогноза основных метеопараметров Черного моря и Крымского п-ова, разработана и уже несколько лет успешно применяется в Морском гидрофизическом институте НАН Украины (<http://vao.hydrophys.org/>).

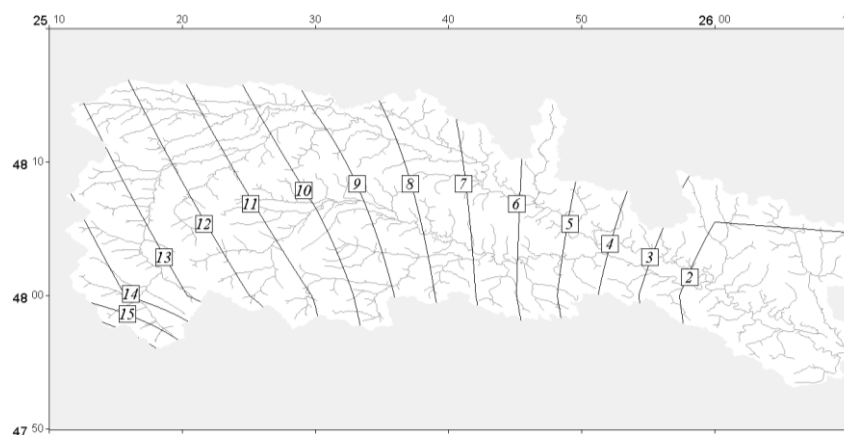
В данной статье пространственно-временное поле атмосферных осадков (летний ливень 23 – 27 июля 2008 г.) было сформировано следующим образом. В качестве реперного был выбран временной ход 12 секундных сумм осадков, сформированный из наблюдаемых в г. Новоднестровске (северо-восточная часть рассматриваемого региона) 3-х часовых сумм [архив <http://rp5.ru/>]. Эти данные представлены на рис.3.

Процесс развивался приблизительно так: за сутки до начала катастрофы выпало более 10 мм осадков, что привело к увлажнению почвы и лесных массивов. Затем начался катастрофический ливень. Видим, что за первые



12 ч выпало 73 мм осадков. После часовой паузы – еще 27 мм. За вторые сутки выпало «всего» 25 мм. Третьи сутки – пауза (1 мм), 26 июля (четвертые сутки) – новый удар: 78 мм.

Р и с . 3 . Аппроксимация временного хода часовых сумм осадков P в г.Новоднестровске (23 – 27 июля 2008 г., серые линии, левая шкала, мм/ч). Черная кривая – накопленная сумма осадков (мм, правая шкала).



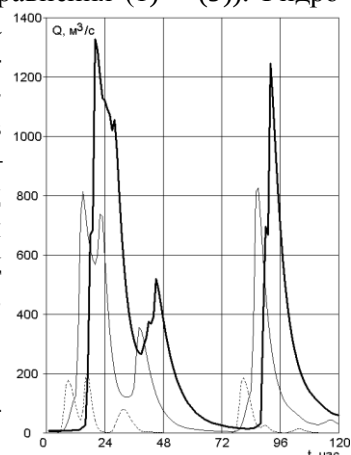
Р и с . 4 . Среднегодовые величины поверхностного стока в июле (мм/мес) по данным [7] (показаны композитные значения). Пространственное распределение модельных осадков строилось пропорционально пространственному распределению композитных значений.

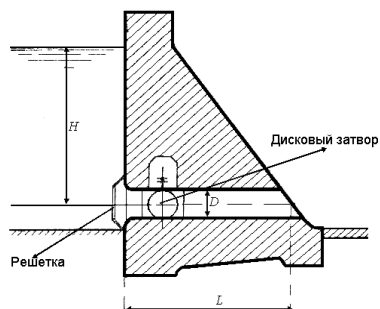
Таким образом, за четверо суток с 23 по 26 июля 2008 г. в Новоднестровске, как и во всем регионе, выпало более 200 мм осадков (3 – 4-х месячная норма). По данным многолетних наблюдений – это минимальная величина для рассматриваемого региона, т.к. толщина слоя выпавших осадков обычно нарастает с востока на запад. Известно (<http://www.ignau.org.ua/>), что годовые и среднемесячные суммы осадков в регионе, представленном на рис.2, меняются от 600 мм/год в восточной части региона до 1000 мм/год и более в его западной, горной части.

На рис.4 представлено пространственное распределение среднегодовых значений композитов склонового стока в июле (мм/мес), полученных по данным наблюдений о расходах рек в [7]. Модельное количество осадков в каждой ячейке рассматриваемого региона и для каждого момента времени пересчитывалось из распределения на рис.3, пропорционально пространственному распределению, представленному на рис.4.

На рис.5 приведены модельные гидрографы для пунктов Долишний Шепот (пунктир), Сторожинец (тонкая кривая), Сирет (жирная кривая), полученные на основе гидравлической модели (уравнения (1) – (9)). Гидрографы для остальных пунктов, отмеченных на рис.2, не показаны, чтобы не загромождать рисунок. Паводок такого масштаба, как модельный, бывает в этом регионе примерно один раз в 50 лет. По данным [8], максимальный за 1952 – 2002 гг. расход реки Сирет в пункте Сторожинец был зафиксирован 13 июля 1969 г. и был равен $816 \text{ м}^3/\text{с}$. В нашем случае, максимальный расход в пункте Сторожинец составил $815 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис.5, тонкая сплошная линия, середина первых суток).

Р и с . 5 . Ожидаемый расход $Q \text{ (м}^3/\text{с)}$ в пунктах Долишний Шепот (---), Сторожинец (—), Сирет (—).





Р и с . 6 . Схема плотины (из [5]).

Посмотрим, какие изменения масштабов, а значит и последствий паводка, могли произойти, если бы на реке Сирет перед селом Лопушна (рис.6) была проложена труба диаметром 2 м с защитной решеткой, а над ней построена плотина высотой около 20 м. В результате, во время паводков часть воды Q , рассчитываемая по формуле (10), уходила бы через трубу дальше, в русло реки, а остаток временно аккумулировался в образовавшейся «сухой» емкости (максимальная площадь ее водного зеркала $0,780 \text{ км}^2$, максимальный объем $8,073 \text{ млн. м}^3$).

Расчет водоспуска $Q \text{ (м}^3/\text{с)}$ при плотине (рис.6) проводился нами по известным полуэмпирическим методикам, на основе формулы Торричелли [5].

Приведем вариант расчета при истечении воды из трубы в атмосферу:

$$Q = \mu \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2gH}, \quad (10)$$

где D – диаметр трубы, H – высота воды. Коэффициент расхода μ равен

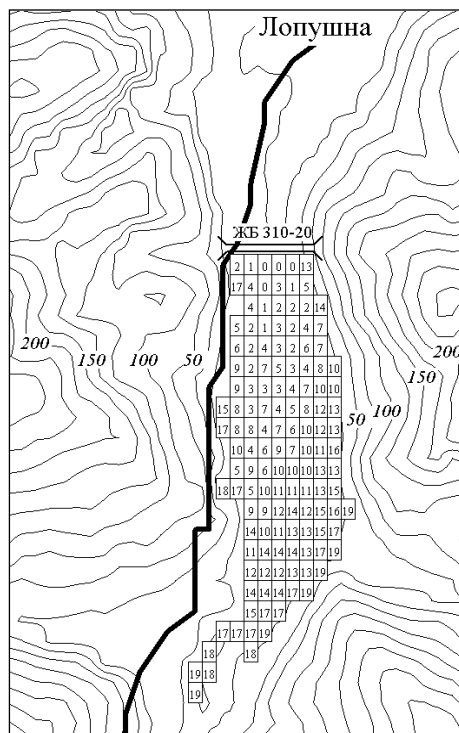
$$\mu = \frac{1}{\sum \sqrt{1 + \sum \zeta + \lambda \frac{l}{D}}}, \quad (11)$$

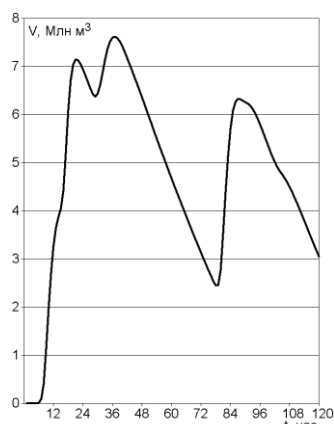
где $\sum \zeta$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений, учитывающих наличие (обязательное) решетки при входе в трубу, наличие затвора и плавного входа в нее (не обязательное), λ – коэффициент сопротивления по длине (для больших диаметров независимо от материалов стенок трубы $\lambda \approx 0,025$).

На рис.7 приведена карта-схема аккумулирующей емкости № 1, «построенной» перед пунктом Лопушна. Прямоугольники отмечают затопляемый участок. Изолинии и числа в прямоугольниках показывают высоту (м) над уровнем основания плотины (552 м). Черная жирная линия – автомобильная дорога.

Временной ход процесса заполнения этой аккумулирующей емкости

Р и с . 7 . Схема аккумулирующей емкости №1 «построенной» перед пунктом Лопушна. Изолинии и числа в прямоугольниках показывают высоту (м) над уровнем основания плотины (552 м). Черная жирная линия – автомобильная дорога.





Р и с . 8 . Ожидаемое изменение объема V (млн. $\text{м}^3/\text{с}$) воды в аккумуляющей емкости на реке Сирет выше села Лопушна во время паводка 23 – 27 июля 2008 г.

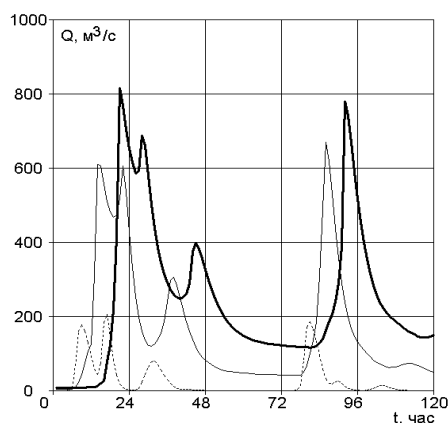
в течение пяти паводковых суток представлен на рис.8. Видно, что максимальный объем воды в емкости достиг бы почти 8 млн. м^3 . Заметим, что даже при таком, экстремальном для данной аккумуляющей емкости объеме воды, ее уровень все равно бы не поднялся до проходящей рядом с плотиной автомобильной дороги.

На рис.9, аналогично рис.5, приведены ожидаемый расход Q ($\text{м}^3/\text{с}$) в пунктах Долишний Шепот (пунктир), Сторожинец (тонкая кривая), Сирет (жирная кривая) при наличии в регионе двух аккумуляющих емкостей (первая уже описана и показана на рис.6 и 7). Вторая емкость «построена» около села Верхние Петровцы, на реке Малый Сирет. Ее параметры: диаметр трубы 3 м, высота плотины 11 м, максимальная площадь водного зеркала 2,929 км^2 , максимальный объем 13,669 млн. м^3 .

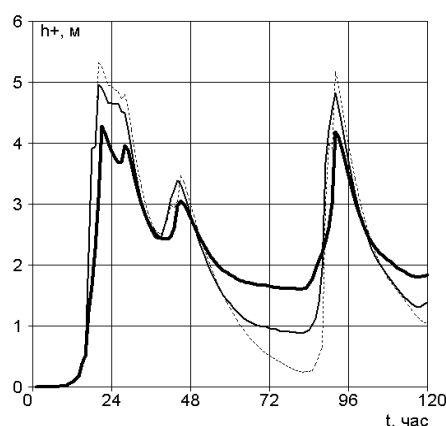
Видно, что в п. Долишний Шепот (выше по течению 1-й емкости) никаких изменений, естественно, не произошло.

В п.Сторожинец (тонкая кривая), на расход воды в котором повлияла только аккумуляющая емкость № 1, произошло значительное уменьшение расхода Q (в пиках с 800 до 600 $\text{м}^3/\text{с}$). Отметим более медленное спадание величины Q , обусловленное уходом воды из емкости в русло, после прекращения дождя (сравнить временные интервалы 48 – 72 и 96 – 120 ч на рис.5 и 9).

В пункте Сирет (нижний правый угол на карте региона) эффект от применения емкостей усилился из-за влияния на расход Q дополнительной аккумуляющей емкости.



Р и с . 9 . Ожидаемый расход Q ($\text{м}^3/\text{с}$) в п. Долишний Шепот (---), п. Сторожинец (—), п. Сирет (—) при наличии двух аккумуляющих емкостей: в п. Лопушна (река Сирет) и п. Верхние Петровцы (река Малый Сирет).



Р и с . 10 . Ожидаемое поднятие уровня воды H (м) в п. Сирет: без аккумуляющих емкостей (---), при наличии одной емкости в п.Лопушна (—), при наличии двух емкостей (Лопушна, Верхние Петровцы) (—).

мулирующей емкости № 2, «построенной» нами на р.Малый Сирет в районе пункта Верхние Петровцы. Сравнивая рис.5 и 9, убеждаемся, что максимум Q уменьшился бы здесь с 1200 м³/с и более до 800 м³/с, а уровень воды в реке Сирет (рис.10) понизился бы примерно на 1 м.

Выводы. Проблема катастрофических паводков в украинской части бассейна реки Сирет кардинально решается путем создания в регионе 3 – 4 аккумулярующих воду емкостей. Ввиду высокой стоимости таких проектов, вопрос о количестве емкостей, их точном местоположении и гидрологических параметрах требует более детальной экспериментальной и теоретической проработки после проведения полевых гидрогеологических исследований. Потребуется повторное (уточняющее) моделирование, учитывающее результаты новых данных натурных наблюдений. А после него – анализ экономических и экологических аспектов проблемы (доступности места строительства, состояния гидрографической сети, заселенности района, развития промышленности и сельского хозяйства, сплава леса и т.п.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В.А., Прусов А.В.* Гидравлическая модель водной системы Украины // Доп. НАН України.– 2004.– № 9.– С.119-125.
2. *Иванов В.А., Прусов А.В.* Речной сток юга Украины: количественные оценки паводков, принципы управления и прогноз.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.– 232 с.
3. *Иванов В.А., Прусов А.В.* Автоматизированный поиск направлений водных потоков по данным цифровых моделей рельефа // Доп. НАН України.– 2006.– № 11.– С.165-171.
4. *Masson V., Champeaux J.-L., Chauvin F., Meriguet C., Lacaze R.* Global database of land surface parameters at 1 km resolution in meteorological and climate models // J. Climate.– 2003.– v.16, № 9.– P.1261-1282.
5. *Киселев П.Г.* Справочник по гидравлическим расчетам.– М.: Госэнергоиздат, 1957.– 352 с.
6. *Urban hydrology for small watersheds* // US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division.– Technical Release 55.– 1986.– 152 p.
7. *Fekete B.M., Vörösmarty C.J., Grabs W.* Global composite runoff fields based on observed river discharge and simulated water balances.– Koblenz: WMO-Global Runoff Data Centre, 1999.– 109 p.
8. *Сусідко М.М., Полякова С.О., Щербак А.В.* Каталог характеристик дощових і сніго-дощових паводків на річках Карпатського регіону за 1989-2002 роки // Наук. праці УкрНДГМІ.– 2006.– вип.255.– С.299-310.

Матеріал поступив в редакцію 30.10.2010 г.