

Математические модели режимов работы системы противопаводковых гидроузлов

В.И. Антонов¹, Р.В. Давыдов¹, В.И. Масликов¹, Д.В. Молодцов¹, А.Н. Чусов¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251

Аннотация. Стремительное распространение ливневых наводнений на большие территории требует управления паводком во всем речном бассейне путем создания системы, распределенных на водосборе гидроузлов с различными функциональными свойствами. Центральным звеном системы является русловой гидроузел с ГЭС комплексного назначения. Кроме того, в систему включают дополнительные гидроузлы с саморегулирующимися водохранилищами на боковых притоках. Для оценки эффекта регулирования экстремальных расходов противопаводковыми гидроузлами необходима разработка специальных математических моделей, отражающих специфику их функционирования. В работе представлены унифицированные математические модели комплексного гидроузла с ГЭС, противопаводкового перехватывающего гидроузла, реализованные в компьютерной программе, которая позволяет определять основные параметры и режимы работы гидроузлов при выполнении расчетов в широком диапазоне исходных данных. Это позволяет уточнить параметры и режимы работы каждого из гидроузлов с учетом современных экономических и экологических требований, произвести оценку энерго-экономических и экологических последствий при функционировании системы распределенных на водосборе гидроузлов.

1. Введение

В настоящее время во многих странах мира остро стоит вопрос защиты земель от наводнений, которые всегда считались наиболее значимой природной опасностью с точки зрения экономических потерь [1-3]. Наблюдаемое изменение климата привело к резкому увеличению частоты крупных наводнений, сопровождающихся возрастанием экономического ущерба и числа пострадавших [4, 5].

Особенно тяжелые последствия вызывают ливневые наводнения. Главная опасность заключается в их внезапности и резком увеличении объема речного стока, многократно превышающего объем весеннего половодья. В последние десятилетия многие регионы мира подвергались сильнейшим наводнениям вызванными ливневыми дождями [6, 7].

Защита территории от наводнений в настоящее время осуществляется методами, не в полной мере учитывающими сложившуюся ситуацию и ее неопределенность в ближайшем будущем и в перспективе – рост численности населения, изменение климата и структуры землепользования (освоение земель, вырубка лесов, сокращение водно-болотных угодий) [8, 9]. В результате дорогостоящие мероприятия оказываются малоэффективными. В связи с этим меняется концепция борьбы с наводнениями: от локальных мероприятий по защите земель в конкретном месте к управлению риском наводнения в масштабе речного бассейна.

В последние годы во всем мире повысился интерес к комплексным гидроузлам, особенно после катастрофических наводнений начала XXI века, имевших место в Германии, Италии, Румынии, Китае, США, России и других странах. Строительство ряда комплексных гидроузлов с ГЭС позволяет значительно повысить степень защищенности территорий от наводнений в нижнем бьефе путем срезки паводковых вод при их аккумулировании в водохранилищах [10].

С учетом глобального изменения климата и, как следствие, увеличения речного стока необходимо пересмотреть ранее выполненные проекты ГЭС в части активного воздействия на экстремальный сток. При возрастании максимальных расходов воды противопаводковая емкость действующих и запроектированных гидроузлов может оказаться недостаточной для трансформации расчетного паводка. Форсированный подпорный уровень (ФПУ) принятый в качестве условия пропуска экстремальных паводков не может быть превышен, в результате чего возрастет сбросной максимальный расход воды в нижнем бьефе гидроузла, расширится зона затопления. Для обеспечения проектных условий в бьефах комплексного гидроузла необходимо часть дополнительной емкости разместить в перехватывающих саморегулируемых водохранилищах на боковых притоках речного бассейна. Для гидроузлов на боковых притоках предусматривается выполнение основных природоохранных требований: сохранение паводкопойменных процессов [11-13], сохранение экосистем при их кратковременном затоплении с ограничением времени затопления естественного ландшафта и др. [14-16].

2. Математические модели

Для оценки эффекта регулирования экстремальных расходов воды системой, распределенных на водосборе противопаводковых гидроузлов с учетом требований охраны окружающей среды разработаны следующие математические модели [17, 18]:

- режимов работы комплексного гидроузла с ГЭС;
- режимов работы противопаводкового гидроузла;

Их использование позволяет смоделировать регулирование речного стока как одиночным комплексным гидроузлом, так и при его совместной работе с противопаводковыми гидроузлами на боковых притоках и определить эффективность предложенного способа борьбы с наводнениями в речном бассейне.

С целью обеспечения проектной энергоотдачи комплексным гидроузлом с ГЭС, минимизации экономических и экологических ущербов в современных и перспективных условиях корректируется проектный форсируемый объём и уточняются максимальные расходы в нижнем бьефе комплексного гидроузла. При их превышении определяется перехватывающая емкость ΔV , размещаемая на боковых притоках. Критерием достижения необходимой суммарной емкости русловой ГЭС и противопаводковых гидроузлов является не превышение максимально допустимых расходов в нижнем бьефе ($Q_{\text{МАКС}}$):

$$Q_{\text{НБ}}^{\text{ГЭС}}(t) \leq Q_{\text{МАКС}} \quad (1)$$

Объем воды в водохранилище в момент времени t :

$$V(t) = V(t-1) + [Q_{\text{ПР}}^*(t) - (Q_{\text{Т}}^{\text{ГЭС}}(t) + Q_{\text{Фил}}(t) + Q_{\text{ХС}}(t) + Q_{\text{Исп}}(t) + Q_{\text{ХН}}(t))] * T_1 \quad (2)$$

где $Q_{\text{Т}}^{\text{ГЭС}}(t)$ – расход воды через турбины ГЭС, $Q_{\text{Фил}}(t)$ – фильтрационный расход воды, $Q_{\text{ХС}}(t)$ – холостой сброс через водопропускные сооружения, $Q_{\text{Исп}}(t)$ – потери воды на испарение с поверхности водохранилища, $Q_{\text{ХН}}(t)$ – расход воды, забираемый из верхнего бьефа гидроузла на хозяйственные нужды, T_1 – расчетный интервал времени, $Q_{\text{ПР}}^*(t)$ – расход воды, поступающий в водохранилище комплексного гидроузла с учетом зарегулированных расходов на боковых притоках при работе гидроузлов:

$$Q_{\text{ПР}}^*(t) = Q_{\text{ПР}}(t) \pm \sum_1^k \Delta Q_i^6(t) \quad (3)$$

где k – количество противопаводковых гидроузлов в речном бассейне, $\Delta Q_i^6(t)$ – разность между естественным $Q_{\text{пр}_i}^6(t)$ и зарегулированным $Q_{\text{зарег}_i}^6(t)$ расходами в нижнем бьефе i -го противопаводкового гидроузла на боковом притоке:

$$\Delta Q_i^6(t) = Q_{\text{пр}_i}^6(t) - Q_{\text{зарег}_i}^6(t) \quad (4)$$

Расчеты производятся с учетом времени добега воды.

3. Результаты

Для реализации математических моделей было создано программное обеспечение на языке MATLAB, с использованием которого были проанализированы возможные сценарии регулирования экстремальных расходов воды в речном бассейне комплексным гидроузлом. В качестве примера рассмотрен вариант увеличения расчетного паводкового расхода для одной из рек в Дальневосточном регионе России, где вследствие климатических изменений прогнозируется в ближайшей перспективе увеличение примерно на 10% экстремального стока. Отметка ФПУ проектная. На рисунках 1 и 2 представлены результаты моделирования режимов работы комплексного гидроузла.

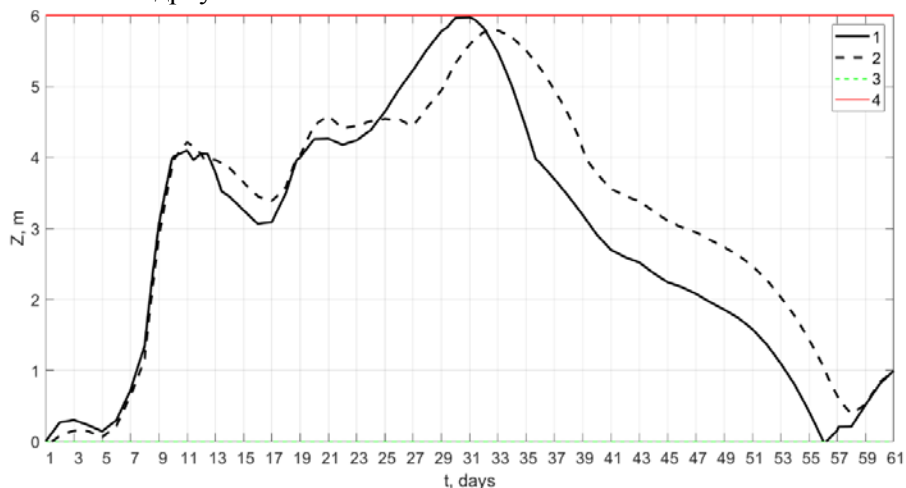


Рисунок 1. Изменение относительного уровня воды в верхнем бьефе комплексного гидроузла (при увеличении на 10% паводкового расхода относительно проектного). 1 – уровень воды в верхнем бьефе комплексного гидроузла, 2 – уровень воды в верхнем бьефе комплексного гидроузла при работе противопаводкового гидроузла, 3 – НПУ (нормальный подпорный уровень), 4 – ФПУ.

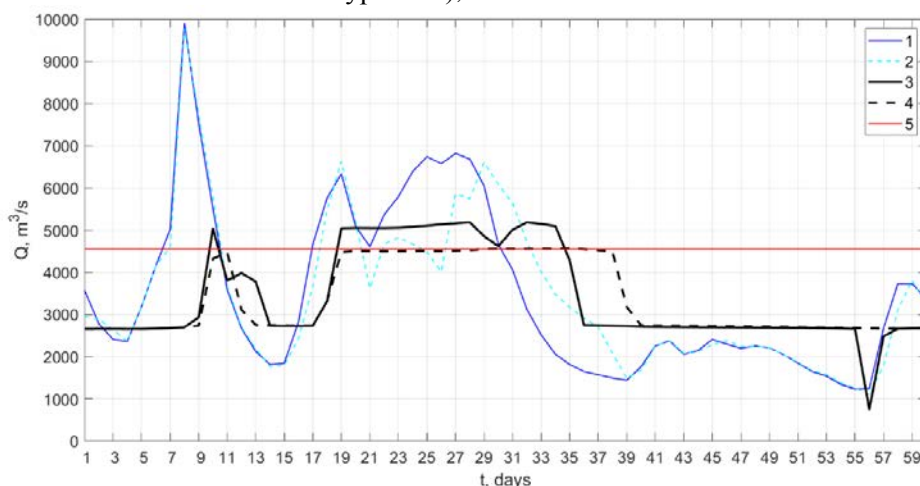


Рисунок 2. Изменение расходов воды в бьефах комплексного гидроузла (при увеличении на 10% паводкового расхода относительно проектного). 1 – расчетный приток воды в русловое водохранилище, 2 – приток воды в русловое водохранилище при работе противопаводкового гидроузла, 3 – расход воды в нижнем бьефе комплексного гидроузла, 4 – расход воды в нижнем бьефе комплексного гидроузла при работе противопаводкового гидроузла, 5 – проектный максимально допустимый расход воды в нижнем бьефе.

На одном из боковых притоков размещается дополнительная перехватывающая емкость, создаваемая в неэнергетическом гидроузле с временно заполняемым саморегулирующимся

водохранилищем. Режимы работы гидроузла (с учетом природоохранных требований) при увеличении экстремального расхода бокового притока на 10% приведены на рисунках 3 и 4.

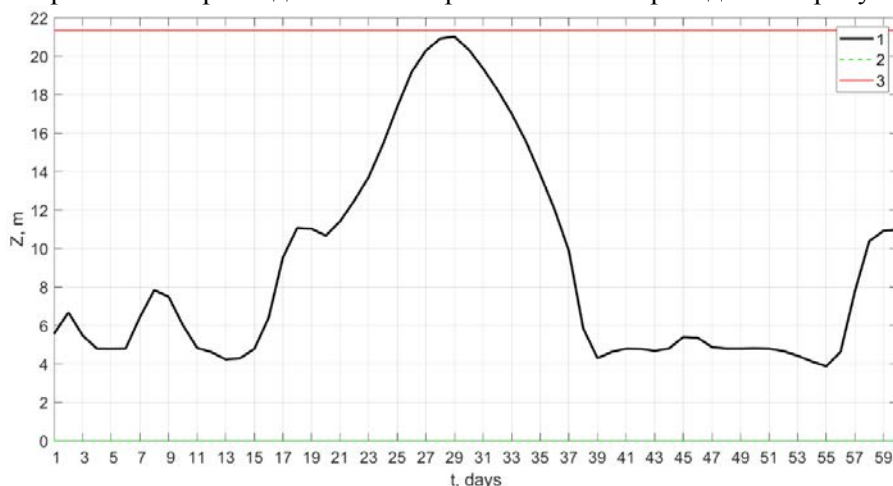


Рисунок 3. Изменение уровня воды в противопаводковом гидроузле на боковом притоке (при увеличении на 10% паводкового расхода относительно проектного). 1 – уровень воды в верхнем бьефе противопаводкового гидроузла, 2 – отметка дна, 3 – проектный максимально допустимый уровень при пропуске расчетного паводка.

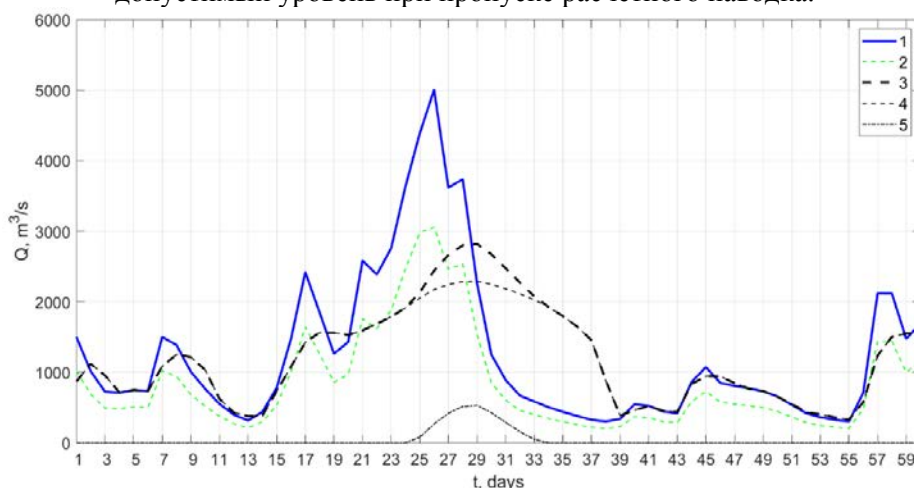


Рисунок 4. Изменение расходов воды в нижнем бьефе противопаводкового гидроузла на боковом притоке (при увеличении на 10% паводкового расхода относительно проектного). 1 – естественный расход воды 1% обеспеченности, 2 – естественный расход воды 10% обеспеченности, 3 – зарегулированный расход воды в нижнем бьефе гидроузла, 4 – расход воды через донные водосбросы, 5 – расход воды через поверхностный водосброс.

В случае работы только комплексного гидроузла из-за нехватки аккумулирующей емкости максимальные расходы воды в нижнем бьефе в отдельные периоды превысят проектные допустимые (примерно на 10%). Соответственно произойдет повышение уровня воды и возрастет площадь затопления земель. При использовании дополнительного перехватывающего противопаводкового гидроузла на боковом притоке уменьшается приток воды в русловое водохранилище и обеспечиваются предельно допустимые максимальные расходы воды в нижнем бьефе комплексного гидроузла.

4. Выводы

При возрастании максимального речного стока в следствие климатических изменений проектного форсированного объема комплексного гидроузла оказывается недостаточно для трансформации экстремального паводка. В результате моделирования определена необходимая

емкость перехватывающего противопаводкового гидроузла на боковом притоке, а также режимы его работы. Выполненные расчеты режимов функционирования комплексного гидроузла с ГЭС совместно с противопаводковым гидроузлом на боковом притоке показали эффективность разрабатываемых мер по минимизации риска затопления земель и воздействия на окружающую среду. Рассмотренный подход к регулированию экстремальных расходов воды в речном бассейне может быть использован при разработке комплексной программы по борьбе с наводнениями в Российской Федерации.

5. Литература

- [1] Arnell, N.W. The impacts of climate change across the globe: A multi-sectoral assessment / N.W. Arnell, S.N. Gosling // *Climatic Change*. – 2016. – Vol. 134(3). – P. 457-474.
- [2] Donnelly, C. Impacts of climate change on European hydrology at 1.5, 2 and 3 degrees mean global warming above preindustrial level / C. Donnelly, W. Greuell, J. Andersson, D. Gerten, G. Pisacane, P. Roudier, F. Ludwig // *Climatic Change*. – 2017. – Vol. 143. – P. 13-26.
- [3] Badenko, V. Ecological aspect of dam design for flood regulation and sustainable urban development / V. Badenko, N. Badenko, A. Nikonorov, D. Molodtsov, V. Terleev, J. Lednova, V. Maslikov // *MATEC Web of Conf.* – 2016. – Vol. 73. – P. 03003.
- [4] Alfieri, L. Modelling the socio-economic impact of river floods in Europe / L. Alfieri, L. Feyen, P. Salamon, J. Thielen, A. Bianchi, F. Dottori, P. Burek // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2016. – Vol. 16. – P. 1401-1411.
- [5] Fedorov, M. Site selection for flood detention basins with minimum environmental impact / M. Fedorov, V. Badenko, V. Maslikov, A. Chusov // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 165. – P. 1629-1636.
- [6] Alfieri, L. Global warming increases the frequency of river floods in Europe / L. Alfieri, P. Burek, L. Feyen, G. Forzieri // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* – 2015. – Vol. 19. – P. 2247-2260.
- [7] Tanoue, M. Global-scale river flood vulnerability in the last 50 years / M. Tanoue, Y. Hirabayashi, H. Ikeuchi // *Sci. Rep.* – 2016. – Vol. 16. – P. 36021.
- [8] Dottori, F. An operational procedure for rapid flood risk assessment in Europe / F. Dottori, M. Kalas, P. Salamon, A. Bianchi, L. Alfieri, L. Feyen // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2017. – Vol. 17. – P. 1111-1126.
- [9] Chusov, A. Determination of environmental impact factors of flood control hydrosystems with temporarily filled self-regulating reservoirs / A. Chusov, V. Maslikov, D. Molodtsov, O. Manukhina // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2018. – Vol. 692. – P. 1046-1054.
- [10] Fedorov, M. Distributed system of dams for flood protection of urban land to ensure sustainable development / M. Fedorov, V. Badenko, V. Maslikov, A. Chusov // *MATEC Web of Conf.* – 2016. – Vol. 73. – P. 01002.
- [11] Myazin, N.S. New method for determining concentrations of the mixture components during rapid control / N.S. Myazin, S.E. Logunov, V.V. Davydov, N.M. Grebenikova, V.Yu. Rud, V.V. Yushkova // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 929. – P. 012064.
- [12] Fedorov, M.P. Reducing the risk of flooding by using hydro complexes distributed on the drainage basin / M.P. Fedorov, V.I. Maslikov, V.L. Badenko, A.N. Chusov, D.V. Molodtsov // *Power Technology and Engineering* – 2017. – Vol. 51(4). – P. 365-370.
- [13] Давыдов, В.В. Неразрушающий метод экспресс-контроля состояния конденсированных сред для экологического мониторинга / В.В. Давыдов, Н.С. Мязин, Т.И. Давыдова // *Дефектоскопия*. – 2017. – № 7. – С. 52-61.
- [14] Grebenikova, N.M. The universal optical method for condition control of flowing medium / N.M. Grebenikova, K.J. Smirnov, V.V. Artemiev, V.V. Davydov, S.V. Kruzhalov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1038. – P. 012089.
- [15] Давыдов, В.В. Метод определения дефектов на внутренних стенках трубопровода по распределению скорости текущей жидкости / В.В. Давыдов, С.В. Кружалов, Н.М. Гребенникова, К.Я. Смирнов // *Измерительная техника*. – 2018. – № 4. – С. 33-39.

- [16] Давыдов, В.В. Многофункциональный малогабаритный ядерно-магнитный спектрометр / В.В. Давыдов, Н.С. Мязин // Измерительная техника. – 2017. – № 2. – С. 58-62.
- [17] Fedorov, M.P. The simulation models of river flow management by a system of flood control facilities distributed on a drainage basin / M.P. Fedorov, A.N. Chusov, V.I. Maslikov, D.V. Molodtsov, I. Togo // Magazine of Civil Engineering. – 2017. – Vol. 76(8). – P. 40-49.
- [18] Davydov, R. Mathematical simulation of flood management by hydro systems with temporarily flooded reservoirs / R. Davydov, V. Antonov, D. Molodtsov, A. Trebukhin // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Vol. 692. – P. 915-920.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке РФФ в форме гранта (проект № 16-17-00050).

Mathematical models of operating regimes of flood control facility's system

V.I. Antonov¹, R.V. Davydov¹, V.I. Maslikov¹, D.V. Molodtsov¹, A.N. Chusov¹

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya 29, St.Petersburg, Russia, 195251

Abstract. The rapid spread of storm floods over large areas requires flood management throughout the river basin by the creation a system of flood control facilities of various functional purposes distributed in the area. The central part of the system is the hydro system with hydro power plant. In addition, the flood control facilities on the side tributaries with self-regulating reservoir are included in the system. To assess the effect of controlling extreme water discharges by flood control facilities, it is necessary to develop special mathematical models reflecting the specifics of their operation. Unified mathematical models of the hydro complex with hydroelectric power station and the flood control facility are introduced. They are implemented in a computer program that provides the ability to determine the main parameters and operating regimes of hydro systems when calculations in a wide range of initial data are performed. This makes possible specifying the parameters and operation modes of each hydro system with the current economic and environmental requirements, to assess the energy-economic and environmental consequences in the operation of the system of flood control facilities distributed in the area.