

Научная статья

УДК 627.81:556.013:504.05

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-5-66-72>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГРАФА МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА КАК ЧАСТЬ ЗАДАЧИ ТРАНСФОРМАЦИИ ПАВОДКА ЧЕРЕЗ ГИДРОУЗЕЛ

**Раткович Лев Данилович**<sup>1✉</sup>, д-р техн. наук, профессор;

SCOPUS 6506421682; ORCID 0000-0002-6900-2640; Leader ID 4328212; levkivr@mail.ru

**Бовина Юлия Анатольевна**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент;

Leader ID AAE-6031-2022; ORCID 0000-0002-2018-9811; GOOGLE Schhz FBx-IAAAAJ; bovina@rgau-msha.ru

**Соколова Светлана Анатольевна**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент;

Leader ID 2715112; ORCID 0000-0003-3997-6994; SCOPUS 57218659380; sokolovasvetlana@mail.ru

**Манхаль Муалла**<sup>1,2</sup>, аспирант кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами; ORCID 0000-0003-4187-8146; manhal.moualla@mail.ru

<sup>1</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева,

Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

<sup>2</sup> Тишринский университет, Сирия, Латакия

**Аннотация.** Цель исследований – совершенствование методики моделирования гидрографов максимального стока применительно к задаче трансформации экстремальных половодий через водосбросные сооружения гидроузла. Проблема моделирования гидрографов максимального стока весеннего половодья интерпретируется как часть более общей задачи транзита экстремальных половодий через водосбросные сооружения с учетом срезки максимумов в противопаводковых водохранилищах. Формулируется постановка задачи, связанная с решением проблемы наводнений и, соответственно, экономического и экологического ущерба. Решение общей задачи не анализируется, но дается ссылка авторов на соответствующие публикации. Отмечаются условия выбора расчетной обеспеченности максимальных расходов в зависимости от класса сооружений и условий нижнего бьефа. Наличие важных объектов инфраструктуры, промышленных предприятий и сельскохозяйственных угодий может существенно влиять на класс сооружений. Предложена методика моделирования гидрографа с помощью дифференциальной функции распределения Пирсона I типа для случаев одновершинного и двухпикового гидрографов. На основании преимущества такого рода исследований в качестве критериев соответствия натурных и моделируемых гидрографов приняты коэффициенты полноты формы и асимметрии. Приводится теоретическое обоснование и выведены формулы для функций расходов и объемов паводка в зависимости от времени. Алгоритм моделирования реализован в среде Excel с использованием встроенных статистических функций распределения и оптимизационной процедуры поиска решения. Представлен расчетный листинг для набора средних значений параметров, построены очертания гидрографов в зависимости от коэффициента формы, а также номограммы связи коэффициента асимметрии с коэффициентом формы в зависимости от отношения максимального расхода и объема половодья. Рассмотрено также расширение методики для двухпикового гидрографа максимальных расходов на примере Сурского гидроузла на реке Сура.

**Ключевые слова:** гидрограф паводка, функция распределения, трансформация паводка через гидроузел, коэффициент формы гидрографа, коэффициент несимметричности гидрографа, процедура оптимизации «Поиск решения»

**Формат цитирования:** Раткович Л.Д., Бовина Ю.А., Соколова С.А., Манхаль Муалла. Моделирование гидрографа максимального стока как часть задачи трансформации паводка через гидроузел // Природообустройство. 2023. № 5. С. 66-72. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-5-66-72>

© Раткович Л.Д., Бовина Ю.А., Соколова С.А., Манхаль Муалла, 2023

Research article

## SIMULATION OF THE MAXIMUM FLOW HYDROGRAPH AS A PART OF THE PROBLEM OF FLOOD TRANSFORMATION THROUGH A HYDRAULIC SYSTEM

**Ratkovich Lev Danilovich**<sup>1✉</sup>, doctor of technical sciences, professor;

SCOPUS 6506421682; ORCID 0000-0002-6900-2640; Leader ID 4328212; levkivr@mail.ru

**Bovina Yulia Anatolyevna**<sup>1</sup>, candidate of technical sciences, associate professor;

Leader ID AAE-6031-2022; ORCID 0000-0002-2018-9811; GOOGLE SchhzFBx-IAAAAJ; bovin@rgau-msha.ru

**Sokolova Svetlana Anatolyevna**<sup>1</sup>, candidate of technical sciences, associate professor:

Leader ID 2715112; ORCID 0000-0003-3997-6994; SCOPUS 57218659380; sokolovasvetlana@mail.ru

**Manhal Mualla**<sup>1,2</sup>, postgraduate student, department of hydraulics, hydrology and water resources management;

ORCID 0000-0003-4187-8146; manhal.moualla@mail.ru (Syria)

<sup>1</sup>Russian State Agrarian University named after C.A. Timiryazeva, Institute of Land Reclamation, Water Resources and Construction named after A.N. Kostyakova; 127434, Moscow, Timiryazevskaya st., 49, Russia

<sup>2</sup>Tishreen University Syria, Latakia

**Abstract.** Modeling of the maximum flow hydrographs during spring flood is interpreted as part of a more general task as extreme floods transit through spillway structures accounting the cutting of maxima in flood control reservoirs. A general statement of the problem related to solving the problem of floods and related economic and environmental damages requiring carrying out complex compensatory and protective water management and hydraulic engineering measures is formulated. The solution of the general problem is not considered, but the authors' link to the relevant publications is given. The presence of important infrastructure facilities, industrial enterprises and agricultural land can significantly reduce the class of structures. The method of modeling a maximum hydrograph using the Pearson type I differential distribution function for the cases of single-peak and two-peak hydrographs is proposed. Taking into account previous studies of research, the coefficients of completeness of hydrograph form and asymmetry are accepted as criteria for the correspondence of full-scale and simulated hydrographs. A theoretical justification is given and formulas are derived for the functions of maximum flow and flood volumes depending on time. The modeling algorithm is implemented in an Excel environment using built-in statistical beta distribution functions and an optimization procedure "solver". Excel program is presented for a set of average parameter values, outlines of hydrographs are constructed depending on the shape coefficient, as well as nomograms of the relationship of the asymmetry coefficient with the shape coefficient depending on the ratio of the maximum flow rate and the volume of the flood. Methodology for a two-peak hydrograph is also considered, which is illustrated by the example of the Sursky hydroelectric complex on the Sura River.

**Key words:** flood hydrograph, distribution function, transformation of the flood through the hydraulic unit, hydrograph shape coefficient, coefficient of hydrograph asymmetry, optimization procedure "solver"

**Format of citation:** Ratkovich L.D., Bovina Yu.A., Sokolova S.A., Manhal Mualla. Simulation of the maximum flow hydrograph as a part of the problem of flood transformation through a hydraulic system // Prirodoobustrojstvo. 2023. № 5. P. 66-72. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-5-66-72>

**Введение.** В Российской Федерации периодически затопляются площади, составляющие 0,5 млн км<sup>2</sup>, а третья их часть подвержена катастрофическим наводнениям. Здесь расположены сотни городов, десятки тысяч населенных пунктов, около 8 млн га сельскохозяйственных угодий.

Согласно материалам Федеральной противопаводковой программы от 1995 г. [1, 2] паводкоопасные территории распространены в бассейнах и подбассейнах рек Амура, Енисея, Волги, Северного Кавказа, острова Сахалин, Забайкалья. Проблема позиционируется как многофакторная во всех странах, причем решается и на стадии проектирования водохозяйственных объектов, и в процессе эксплуатации водохозяйственных систем. Успех проекта решения зависит от квалифицированного анализа водного фактора, надежности оценки параметров сооружений и эффективности комплекса защитных мероприятий в верхнем и нижнем бьефах, корректной оценки стоимости проекта и эксплуатационных затрат.

Существует несколько способов защиты от затоплений, вызванных весенним половодьем. Остановимся на решении задачи, возникающей в случае регулирования половодного стока в водохранилище. Очевидно, при снижении возможности аккумуляции половодного или паводкового стоков в верхнем бьефе (сокращение объема форсировки) увеличивается стоимость сооружений водосбросного фронта, повышается опасность затопления в нижнем течении, и как следствие, возрастает стоимость гидроузла и компенсационных защитных сооружений. Очертание гидрографа и объем паводка играют определяющую роль в проектировании противопаводковых мероприятий.

**Цель исследований:** совершенствование методики моделирования гидрографов максимального стока применительно к задаче трансформации экстремальных половодий через водосбросные сооружения гидроузла. Затрагиваются общая постановка задачи технико-экономического анализа при пропуске гидрографов

максимального стока, имитационное моделирование транзита максимальных расходов в нижний бьеф гидроузла. Предложена методика моделирования гидрографа с помощью функции распределения Пирсона I типа для случаев одностороннего и двухпикового гидрографов.

#### Материалы и методы исследований.

Трансформация максимального стока через водосбросные сооружения водохранилищного гидроузла является неизменно актуальной в водохозяйственной и гидротехнической практике проектирования и эксплуатации гидроузлов и водохранилищ. Научная поддержка задач, связанных с отмеченной проблемой, касается методик расчета и моделирования максимальных расходов паводков и половодий, баланса водных масс в верхнем и нижнем бьефах конкретных сооружений, обоснования параметров водохранилищ и всех задействованных типов водосбросов для обеспечения рационального транзита максимальных расходов в нижнем бьефе гидроузлов.

Проектирование постоянных речных сооружений опирается на значение обеспеченности, которая в свою очередь определяется классом сооружения и назначается для двух случаев – основного расчетного и поверочного. Основной случай соответствует расчетной обеспеченности максимального расхода, поверочный – экстремальной ситуации.

Класс сооружений, определяемый нормативными документами [3], зависит не только от масштабов гидроузла (высота плотины), но и не в меньшей степени – от условий нижнего бьефа, где происходит трансформация стока, обусловленная как величиной расхода воды, так и морфометрией нижележащих створов. Следствием прохождения максимальных расходов является общая картина затопления и подтопления территорий. В каждом случае величина ущерба и стоимость компенсационных мероприятий являются неодинаковыми, поэтому на конкретном объекте класс сооружения с учетом социально-экономических последствий затопления может быть повышен на 1-2 ступени: например, с III-IV до I-II классов. Разумеется, это влечет за собой повышение расчетных максимальных расходов. Так, при умеренных значениях коэффициента вариации максимальных расходов  $C_v = 0,4$  и повышении класса сооружений с IV до II максимальный расчетный и поверочный расходы увеличиваются примерно на 25%.

Транзит максимального стока из верхнего бьефа гидроузла в нижний сопровождается последствиями, экономическая оценка которых основана на многофакторном анализе обстановки в верхнем и нижнем бьефах гидроузлов, и непосредственно – на водосбросных сооружениях [4]. Функция цели  $Z$

может быть представлена в виде суммарных экологических и экономических затрат, покрывающих глобальную картину ущерба посредством природоохранных и гидротехнических мероприятий. Под затратами будем понимать некие приведенные затраты, учитывающие как инвестиции, так и эксплуатационные расходы. Упрощенная версия подхода выглядит следующим образом:

$$Z = Z_{\text{ВВ}} + Z_{\text{r/y}} + Z_{\text{НБ}} \min, \quad (1)$$

где  $Z_{\text{ВВ}}$  – затраты в верхнем бьефе, связанные с созданием противопаводкового водохранилища;  $Z_{\text{r/y}}$  – затраты на строительство гидроузла, обусловленные как пропускной способностью водосбросов, так и высотой плотины, образующей водохранилище;  $Z_{\text{НБ}}$  – затраты на строительство и эксплуатацию защитных сооружений в нижнем бьефе вследствие затопления, гарантирующие безопасность жизнедеятельности для населения, объектов инфраструктуры, промышленных, энергетических и сельскохозяйственных объектов [4, 5].

Решение этой задачи в конкретном проекте дает возможность определить укрупненные технико-экономические показатели проекта, в том числе объемы водохранилищ, параметры гидроузлов, высоту защитных дамб в нижнем бьефе и ряд других показателей. Все эти характеристики полностью зависят от гидрологического режима. Зависимость каждой из составляющих функционала (1) от гидрографа притока очевидна, поскольку  $Z_{\text{об}}$  определяется противопаводковой емкостью водохранилища,  $Z_{\text{cy}}$  и  $Z_{\text{нб}}$  обусловлены величиной максимального транзитного расхода.

Методика определения расходов и объемов максимального стока представляет собой самостоятельную задачу [6], сложность которой усиливается вследствие факторов антропогенного влияния и вероятных изменений климата, вызывающих перераспределение ЭВВ. Все эти вопросы нуждаются в дополнительных исследованиях.

Поскольку общая задача не может быть решена без имитационного моделирования, должна быть определена и модель расчетного гидрографа, в том числе при отсутствии материалов наблюдений. Исследования, посвященные данной конкретной задаче, изложены ниже.

*Описание модели гидрографа.* Используются функции для аналитического описания максимального гидрографа расчетной обеспеченности исследуемого водосбора площадью  $A$ . Плотность двухпараметрического бета-распределения  $f$  принята в исследованиях для описания формы максимального гидрографа:

$$f(\alpha, \beta, \tau) = \frac{\tau^{(\alpha-1)} \cdot (1-\tau)^{(\beta-1)}}{B(\alpha, \beta)}, \quad (2)$$

где  $\alpha, \beta$  – параметры распределения;  $\tau = t/T$  – относительная текущая координата времени в долях от продолжительности половодья (паводка)  $T$  (сут.),  $t = \tau \cdot T$ ,  $\tau \in [0; 1]$ ;

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 \tau^{(\alpha-1)} \cdot (1-\tau)^{(\beta-1)} d\tau;$$

$d\tau$  – бета-функция Эйлера

В данной постановке  $B(\alpha, \beta) = 1$ , а интегральная функция распределения имеет вид:

$$F(\alpha, \beta, \tau) = \int_0^{\tau} \tau^{(\alpha-1)} \cdot (1-\tau)^{(\beta-1)} d\tau,$$

текущее значение бета-функции для аргумента  $\tau$ .

Переход непосредственно к гидрологическим характеристикам выглядит следующим образом:

$$Q(t) = \varphi \cdot f(\alpha, \beta, \tau), \quad (3)$$

где  $Q(t)$  – расход воды в момент времени  $t$  (сут.); коэффициент  $\varphi$  – масштабный множитель для пересчета ординат  $f(\alpha, \beta, \tau)$  в абсолютные значения расхода на  $t$ -е сутки:

$$W(t) = 0,0864 \cdot \varphi \cdot T \cdot F, \quad (4)$$

где  $W(t)$  – объем волны паводка (половодья) на момент  $t$  (млн м<sup>3</sup>).

Тогда весь объем половодья  $W = W(T)$ .

Максимальная величина расхода  $Q_{max}$  (пик половодья) соответствует модальному значению распределения при  $\tau_{пик}$  и максимальному значению функции  $Q(t)$ :

$$\tau_{пик} = \frac{\alpha - 1}{\alpha + \beta - 2}; t_{пик} = \tau_{пик} \cdot T \quad (5)$$

$$Q_{max} = \varphi \cdot f(\alpha, \beta, \tau_{пик}). \quad (6)$$

Критерии соответствия модели, применявшиеся в публикациях исследователей, касавшихся данной тематики, по сути сводятся к двум параметрам – коэффициенту полноты формы гидрографа  $\lambda$  и коэффициенту асимметрии гидрографа  $k_s$ :

$$\lambda = \frac{Q_{max} \cdot t_{пик}}{h}, \quad (7)$$

$$k_s = \frac{h_{пик}}{h}, \quad (8)$$

где  $Q_{max}$  – модуль максимального стока;  $t_{пик}$  – продолжительность подъема половодья;  $h_{пик}$ ,  $h$  – слой половодья за период подъема и за весь период  $T$ .

Физический смысл названных критериев рассматривается ниже. Выразим формулы несколько иначе:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{0,0864 \cdot q_{max} \cdot t_{пик}}{h} = \frac{0,0864 \cdot A \cdot q_{max} \cdot t_{пик}}{A \cdot h} = \\ &= \frac{0,0864 \cdot Q_{max} \cdot t_{пик}}{A \cdot h} = \frac{0,0864 \cdot Q_{max} \cdot t_{пик}}{W}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$k_s = \frac{h_{пик}}{h} = \frac{h_{пик} \cdot A}{h \cdot A} = \frac{W_{пик}}{W}. \quad (10)$$

Смысл второго критерия  $k_s$  очевиден из (10) – это отношение объема половодья (паводка) за период подъема ко всему объему. Что касается коэффициента  $\lambda$ , то его смысл заключается в том, чтобы, оставаясь безразмерным, он одновременно задавал соотношение максимального расхода и объема половодья. Выясним, связанными или независимыми являются искомые параметры распределения.

Выразим момент пика половодья (паводка)  $t_{пик}$  через  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{0,0864 \cdot Q_{max} \cdot t_{пик}}{W} \rightarrow t_{пик} = \frac{\lambda \cdot W}{0,0864 \cdot Q_{max}}. \quad (11)$$

Все величины, входящие в правую часть выражения, фиксированы в качестве исходной информации конкретной задачи, то есть  $t_{пик}$  определено. Следовательно, с учетом (5) получаем зависимость  $\beta$  от  $\alpha$ :

$$\frac{\alpha - 1}{\alpha + \beta - 2} = \tau_{пик} = \frac{t_{пик}}{T} = u \rightarrow \alpha - 1 = \alpha \cdot u + \beta \cdot u - 2u; \quad (12)$$

$$\beta = \frac{\alpha(1-u) + 2u - 1}{u}. \quad (13)$$

Связаны не только параметры распределения, но и несложно показать, что параметры гидрографа  $\lambda$  и  $k_s$  также являются зависимыми. При установленных  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\lambda$  коэффициент  $k_s$  определяется однозначно. Таким образом, подлежат определению только две величины: параметр распределения  $\alpha$  и масштабный коэффициент  $\varphi$ . Это является справедливым для любого двухпараметрического распределения: не только бета-распределения, но и гамма-распределения.

*Алгоритм моделирования.* Определяется очертание (модель) максимального гидрографа расчетного года на основании следующих параметров:

$T$  – продолжительность весеннего половодья (паводка);

$Q_{max}$  – максимальный расход расчетной обеспеченности;

$W$  – объем половодья (паводка);

$\lambda$  – коэффициент формы гидрографа.

Подлежат определению  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\varphi$ ,  $t_{пик}$ ,  $Q(t)$ ,  $W(t)$  при условии максимума  $W_p$ . Расчет сводится к нахождению варьируемых переменных  $\alpha$  и  $\varphi$  с помощью встроенных в Excel дифференциальных и интегральных функций распределения вероятностей Пирсона I типа и процедуры «Поиск решений» (Solver). За функционал в процедуре поиска решения, как отмечено выше, принят объем половодья за период подъема волны  $W_p$ . Максимально достигаемое значение  $W_p$  соответствует гидрографу с максимальной долей подъема волны.

**Результаты и их обсуждение.** Исходная информация и расчетный модуль для варианта средних значений параметров представлены листингом Excel (рис. 1) при значениях максимального суточного расхода  $1000 \text{ м}^3/\text{с}$  и объема половодья продолжительностью 30 сут. –  $1000 \text{ млн м}^3$  ( $1 \text{ км}^3$ ). Здесь же показан блок процедуры поиска решения. Изменение формы гидрографа в зависимости от  $\lambda$  иллюстрируется графиками рисунка 2.

Получение обобщающих характеристик исследования требует построения зависимостей между относительными показателями модели, чтобы не зависеть от конкретных значений максимального расхода и объема половодья. Проведен цикл расчетов для выяснения связи максимального значения  $k_s$  с величиной  $\lambda$ .

Номограммы связи  $k_s$  и  $\lambda$  (рис. 3) при разных значениях отношения  $Q_{\text{max}}/W$  дают возможность оценить результаты моделирования

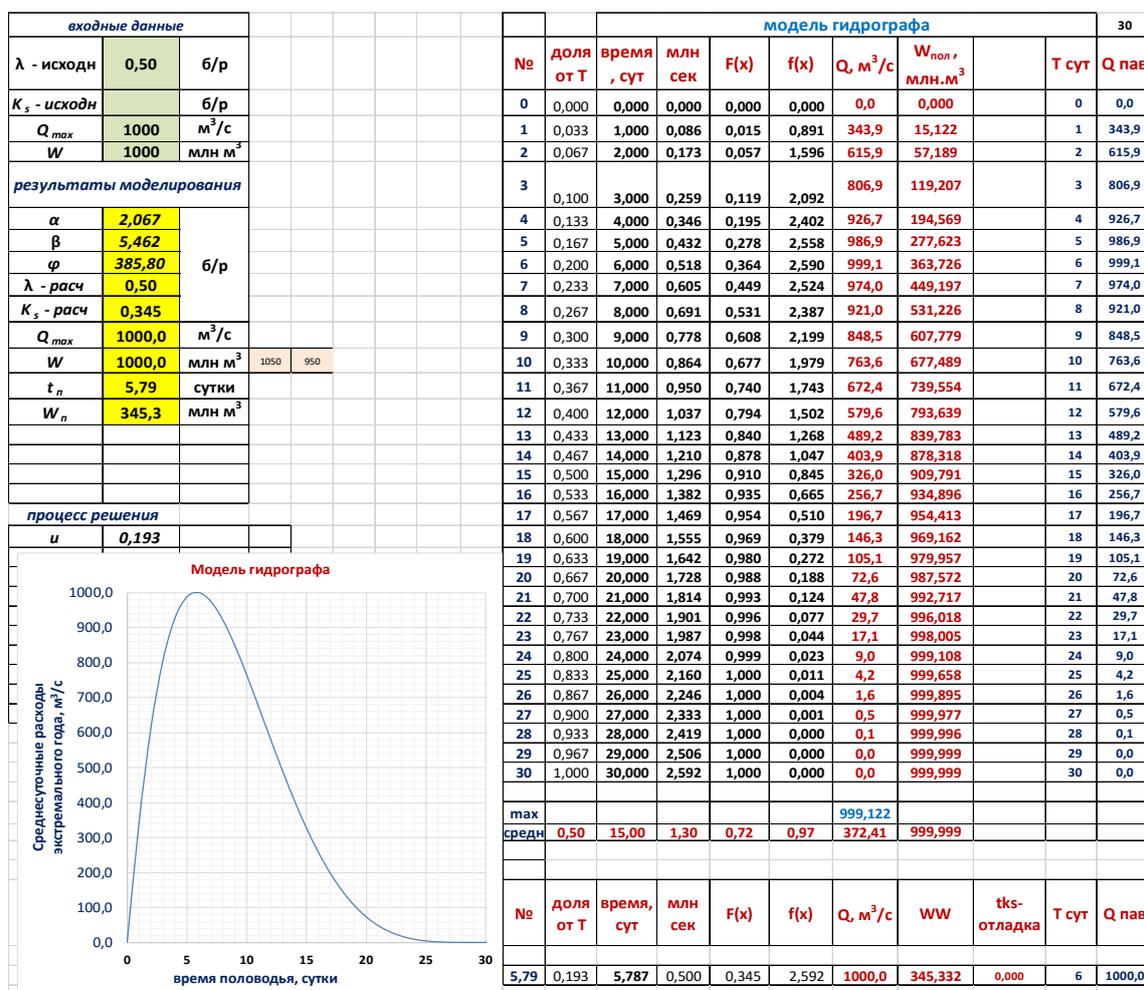


Рис. 1. Расчетный листинг для моделирования при средних значениях исходных параметров  
 Fig. 1. Calculation listing for simulation with average values of initial parameters

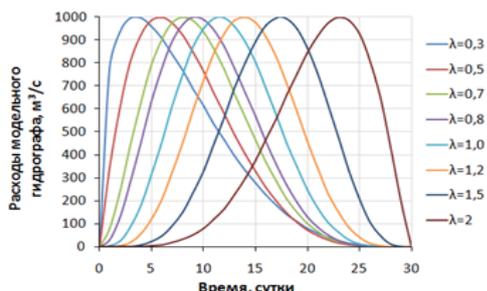


Рис. 2. Изменение формы гидрографа в зависимости от коэффициента  $\lambda$   
 Fig. 2. Change of the hydrograph shape depending on the coefficient  $\lambda$

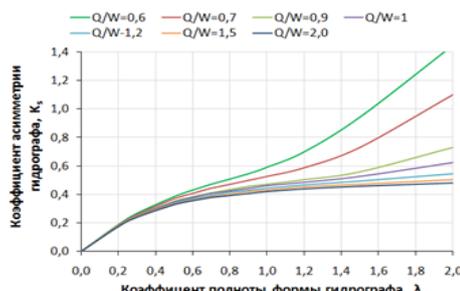


Рис. 3. Графическая зависимость между параметрами модели  
 Fig. 3. Graphical dependence between model parameters

Таблица 1. Связь между параметрами модели гидрографа  
Table 1. Relationship between parameters of the hydrograph model

$\lambda$	Максимальные значения коэффициента асимметрии гидрографа, $K_s$ Maximum values of the hydrograph skewness coefficient, $K_s$						
	Q/W =0,6	Q/W =0,7	Q/W =0,9	Q/W =1	Q/W =1,2	Q/W =1,5	Q/W =2,0
0,20	0,187	0,184	0,181	0,180	0,178	0,177	0,175
0,30	0,265	0,259	0,251	0,249	0,246	0,243	0,240
0,50	0,385	0,368	0,351	0,345	0,338	0,332	0,326
0,60	0,430	0,408	0,385	0,378	0,369	0,361	0,354
0,70	0,470	0,441	0,412	0,404	0,394	0,384	0,377
0,80	0,508	0,470	0,435	0,426	0,413	0,403	0,394
0,90	0,547	0,498	0,455	0,444	0,430	0,418	0,408
1,00	0,589	0,526	0,473	0,460	0,443	0,431	0,420
1,20	0,697	0,587	0,505	0,487	0,467	0,451	0,438
1,50	0,945	0,732	0,558	0,527	0,495	0,473	0,458
2,00	1,450	1,100	0,729	0,624	0,543	0,503	0,480

в реальном диапазоне значений  $Q_{max}/W$ . Размерность показателя соответствует размерности частного от деления  $\frac{Q_{max}}{W} \left[ \frac{\text{м}^3/\text{с}}{\text{млн м}^3} = 10^{-6} \text{с}^{-1} \right]$ .

Используя расчетные номограммы, можно анализировать изменение коэффициентов формы  $\lambda$  и асимметрии гидрографов  $k_s$  также в реальном диапазоне этих параметров.

Распространение методики на случай двухпикового гидрографа может быть основано на композиции двух функций плотности распределения  $f_1$  и  $f_2$  со сдвижкой моды распределения второго максимума:

$$Q_1(t) = \varphi_1 \cdot f_1(\alpha_1, \beta_1, \tau) = \frac{\tau^{(\alpha_1-1)} \cdot (1-\tau)^{(\beta_1-1)}}{B(\alpha_1, \beta_1)}; \quad (14)$$

$$Q_2(t) = \varphi_2 \cdot f_2(\alpha_2, \beta_2, \tau) = \frac{[\tau - \tau_{п1}]^{(\alpha_2-1)} \cdot [1 - (\tau - \tau_{п2})]^{(\beta_2-1)}}{B(\alpha_2, \beta_2)}; \quad (15)$$

$$Q_{max}(t) = Q_1(t) + Q_2(t). \quad (16)$$

Реализация метода выполнена на примере Сурского гидроузла, когда наиболее неблагоприятный гидрограф – двухвершинный.

Описание гидрографов максимального стока является самостоятельной задачей, имеющей теоретическое и практическое значение. Работы по моделированию половодий и паводков обычно связывают с такими исследователями, как Г.А. Алексеев, Д.И. Кочерин, Д.Л. Соколовский [6-8]. Моделирование дождевых паводков рассматривается в работе [9]. Исследования [10] посвящены методике моделирования гидрографа для системы «Озеро-водохранилище» на примере реки Волхов. Д.И. Кочерин предлагал использовать кривые распределения Пирсона III и IV типов. В нашем случае используется бета-распределение (оно же – распределение Пирсона I типа).

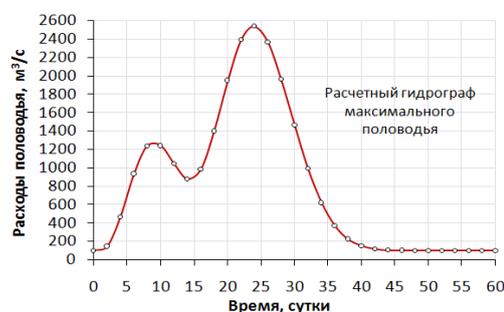


Рис. 4. Модель двухвершинного гидрографа 1%-ной обеспеченности в створе Сурского гидроузла

Fig. 4. Model of a two-peaked hydrograph with 1% availability in the alignment of the Sura hydroelectric complex

Двухпараметрические распределения дают весьма близкие результаты при использовании их для аппроксимации. И в этом случае предложенное распределение является наиболее удобным с точки зрения аналитического описания, поскольку параметры формы гидрографа алгебраически выражаются через параметры бета-распределения.

По нашему мнению, тип распределения не имеет принципиального значения при одинаковом числе параметров. Применение дифференциальных функций известных распределений действительно является целесообразным, что подтверждается работами известных ученых. Конечно, чтобы сделать независимыми анализируемые величины  $\lambda$  и  $k_s$ , потребовалось бы перейти к трехпараметрическому распределению. Сложность такого перехода вряд ли оправдана, однако это подлежит обсуждению. В рекомендуемой модели, чтобы придать решению наиболее неблагоприятную форму для последующих расчетов, функционал ориентирован на максимальную величину объема половодья за период подъема волны.

## Выводы

Трансформация максимального стока через водосбросные сооружения водохранилищного гидроузла является неизменно актуальной в водохозяйственной и гидротехнической практике проектирования и эксплуатации гидроузлов и водохранилищ. Научная поддержка задач, связанных с отмеченной проблемой, касается методов расчета и моделирования максимальных расходов паводков и половодий, баланса водных масс в верхнем и нижнем бьефах конкретных

сооружений, обоснования параметров водохранилищ и всех задействованных типов водосбросов для обеспечения рационального транзита максимальных расходов в нижний бьеф гидроузлов.

Предложенная методика моделирования гидрографов максимального стока дает возможность аналитического описания формы гидрографов для их внедрения в имитационные модели прохождения половодий и паводков через водосбросные сооружения и транзита в нижнее течение реки.

## Список использованных источников

1. **Раткович Д.Я., Раткович Л.Д.** Типы наводнений и пути сокращения вызываемых ими ущербов // *Водные ресурсы*. 2000. Т. 27, № 3. С. 261-266.
2. **Асарин А.Е.** Речные наводнения: причины и последствия. Что можно и нужно сделать? // *Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования*. 2013. № 1. С. 416-427.
3. Определение основных расчетных гидрологических характеристик СП 33-101-2003. Государственный комитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу (Госстрой России). Москва, 2004.
4. **Раткович Л.Д., Алиев Д.А., Колесникова И.Н.** Имитационная модель регулирования гидрографа максимального стока в створе гидроузла // *Научное обозрение*. 2015. № 18. С. 126-137.
5. **Яровенко А.А., Бочанов Э.С., Ключников Д.А.** Экологическая безопасность при затоплениях // *Экология и защита окружающей среды: Сборник тезисов докладов III Международной научно-практической конференции*, г. Минск, 19 мая 2016 г. / Под общ. ред. И.А. Новикова. Минск, 2016. С. 246-251.
6. **Рождественский А.В., Лобанова А.Г.** Современная проблема инженерных гидрологических расчетов по обобщению гидрологической информации в России // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 7. С. 81-95.
7. **Кочерин Д.И.** Вопросы инженерной гидрологии. М. – Л.: НКТП СССР. Энергетическое изд-во, 1932. 208 с.
8. **Соколовский Д.Л.** Речной сток (методы исследований и расчетов): учебное пособие для гидрометеорологических институтов и государственных университетов. Л.: Гидрометеоздат, 1952. 492 с.
9. **Логинов В.Ф., Волчек А.А., Шелест Т.А.** Анализ и моделирование гидрографов дождевых паводков рек Беларуси // *Водные ресурсы*. 2015. Т. 42, № 3. С. 268.
10. **Журавлев С.А.** Моделирование гидрографа стока реки в случае наличия на водосборе системы «Озеро-водохранилище» (на примере р. Волхов) // *Материалы II Международной научно-практической конференции «Науки о Земле на современном этапе»*. М.: Спутник+, 2011. С. 61-64.

## Критерии авторства / Authorship criteria

Раткович Л.Д., Бовина Ю.А., Соколова С.А., Манхаль Муалла выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись.

Раткович Л.Д., Бовина Ю.А., Соколова С.А., Манхаль Муалла имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

## Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов / The authors declare that there are no conflicts of interest

Поступила в редакцию / Received 26.05.2023

Поступила после рецензирования / Received after peer review 23.08.2023

Принята к публикации / Accepted for publication 28.08.2023

## References

1. **Ratkovich D.Ya., Ratkovich L.D.** Types of floods and ways to reduce the damage caused by them // *water resources*. 2000. Vol. 27, No. 3. P. 261-266.
2. **Asarin A.E.** River floods: causes and consequences. What can and should be done? *Strategy of civil protection: problems and research*, 2013. No1. P. 416-427. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/rechnye-navodneniya-prichiny-i-posledstviya-chno-mozhno-i-nuzhno-sdelat>, p. 416-427.
3. Determination of the main calculated hydrological characteristics of SP 33-101-2003. Statecommitteeofthe Russian Federationon constructionandhousing- municipal complex (Gosstroy Rossi), Moscow, 2004. [pkb-titan.ru upload/library/SP/SP\\_33-101-2003.pdf](http://pkb-titan.ru/upload/library/SP/SP_33-101-2003.pdf)
4. **Ratkovich L.D., Aliev D.A., Kolesnikova I.N.** Imitation model of regulation of the hydrograph of the maximum flow in the alignment of the hydroelectric complex. // *Nauchnoe obozrenie*. 2015. № 18. P. 126-137.
5. **Yarovenko A.A., Bochanov E.S., Klyuchnikov D.A.** Ecological safety in flooding // *Ecology and environmental protection: collection of theses of reports of the III International scientific and practical conference*, Minsk, May 19, 2016, ed. by I.A. Novikov. Minsk: 2016, P. 246-251.
6. **Rozhdestvenskij A.V., Lobanova A.G.** Modern problem of engineering hydrological calculations for the generalization of hydrological information in Russia. 2011. No 7. P. 81-95.
7. **Kocherin D.I.** Issues of engineering hydrology. M.–L.: NKTP SSSR. Energy Publishing House. 1932. 208 p.
8. **Sokolovskij Daniil Lvovich.** River runoff. (Methods of research and calculations). Handbook for hydro-meteorological institutes and state universities. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1952. 492 p.
9. **Loginov V.F., Volchek A.A., Shelest T.A.** Analysis and modeling of hydrographs of rain floods of rivers in Belarus. 2015. Vol. 42, No. 3. P. 268.
10. **Zhuravlev S.A.** Modeling of the hydrograph of the river flow in the case of the presence of the “Lake-Reservoir” system in the catchment area (on the example of the Volkhov River) // *Materials of the II International scientific and practical conference “ Earth sciences at the present stage”*, 2011. P. 61-64.

Ratkovich L.D., Bovina Yu.A., Sokolova S.A., Mankhal Mualla carried out heoretical and experimental research on the basis of which they generalized ad wrote a manuscript.

Ratkovich L.D., Bovina Yu.A., Sokolova S.A., Mankhal Mualla have a copyright to the article and are responsibly for plagiarism. All the authors made an equal contribution to the preparation of the publication