

УДК 556.35:628.4:656.23

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ
И ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
АХАНГАРАНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Ж. С. ХАМРОКУЛОВ *

*Ташкентский институт инженеров ирригации
и механизации сельского хозяйства,
НИИУ, Ташкент, Узбекистан*

В статье исследованы методы совершенствования управления расходом воды и механизмов обеспечения безопасности Ахангаранского водохранилища. На основе анализа многолетних гидрологических данных определено вероятностное распределение максимальных расходов воды с использованием трехпараметрического гамма-распределения, а также проведено сравнение полученных результатов с распределением Гумбеля I типа. Расчеты показали, что экстремальный расход воды с обеспеченностью 0,1% составляет 500 м³/с по трехпараметрическому гамма-распределению и 657 м³/с по методу Гумбеля, что на 31–32% выше. На этой основе разработан диспетчерский график водохранилища с нормативным контролем уровня воды и скоростей наполнения и сброса, что обеспечивает эффективное использование водных ресурсов и повышение безопасности при чрезвычайных ситуациях. Результаты исследования создают научную основу для рациональной эксплуатации водохранилища и повышения надежности гидротехнических сооружений.

<https://doi.org/10.46991/PYSUC.2026.60.1.070>

Keywords: reservoir, maximum water discharge, Gumbel distribution, dispatch schedule, safety, emergency situations.

Введение. Водоохранилища играют стратегическую роль в экономике Республики Узбекистан, особенно в условиях орошаемого сельского хозяйства. Они обеспечивают сезонное регулирование водных ресурсов, снижение дефицита воды в вегетационный период и устойчивое водоснабжение гидромелиоративных систем. Континентальный климат, неравномерное распределение осадков и ограниченность водных ресурсов обуславливают необходимость научно обоснованного управления режимом водохранилищ [1].

В последние годы модернизация водного хозяйства определена как приоритетное направление государственной политики. В Постановлении Президента Республики Узбекистан PQ-250 от 15 августа 2025 г. «Программа управления водными ресурсами и развития ирригационной сферы на

* E-mail: hamroqulov1993@mail.ru

2025–2028 годы” особое внимание уделяется повышению эффективности использования водных ресурсов, модернизации ирригационных систем, техническому обновлению гидротехнических сооружений и внедрению цифровых технологий управления. Важным направлением является обеспечение надежности и безопасности водохранилищ, их оснащение современными системами мониторинга и повышение эффективности эксплуатации.

В настоящее время значительная часть водохранилищ республики эксплуатируется более 50–70 лет, что сопровождается процессами физического и технического износа [2]. Это требует усиления контроля за прочностью сооружений, их фильтрационной устойчивостью и эксплуатационной надежностью.

Объем воды в верхнем бьефе водохранилища обладает значительным запасом потенциальной энергии, и при неконтролируемом сбросе может привести к разрушениям и существенному ущербу экономике, экологии и безопасности населения [3]. Чрезвычайные ситуации могут возникать под воздействием природных факторов, таких как землетрясения, паводки и сильные ветры, превышение расчетных значений которых снижает надежность сооружений.

Климатические изменения влияют на гидрологический режим водохранилищ, включая параметры ветровых волн, а также максимальные расходы селевых и паводковых вод. Оценка этих факторов осуществляется на основе статистического анализа многолетних данных гидрометеорологических и сейсмических наблюдений.

Надежность водохранилищ определяется совокупностью факторов: корректностью проектных решений, качеством строительства, соблюдением правил эксплуатации и сроком службы сооружений. Ошибки на любом из этих этапов снижают долговременную устойчивость системы. Учитывая вероятностный характер воздействующих факторов, оценка надежности осуществляется с применением методов математической статистики и теории надежности [4].

Особое значение имеет определение максимальных расходов паводковых вод, необходимое для расчета пропускной способности водосбросных сооружений. Кроме того, оценка годового объема паводкового стока позволяет определить гарантированное водообеспечение потребителей и способность водохранилища аккумулировать поступающие водные ресурсы.

Таким образом, обеспечение надежности и эффективного управления водохранилищами является важной научной и практической задачей, имеющей стратегическое значение в условиях современных реформ водного хозяйства.

Цель исследования – разработать научно обоснованную методику оценки максимальных расходов воды в Ахангаранском водохранилище и совершенствование управления его режимом с учетом экстремальных гидрологических явлений.

Материалы и методы исследования. Для анализа экстремальных гидрологических явлений и оценки максимальных расходов воды в водохранилище использованы многолетние гидрологические наблюдения за рекой Ахангаран на стационарном гидропосту “Турк” за период 2000–2024 гг. Исходные данные включают годовые максимальные расходы воды ($Q_{\text{макс.}i}$) и

зафиксированные экстремальные значения (Q_N), зарегистрированные в пределах и за пределами расчетного периода. Все ряды прошли предварительную проверку на однородность и репрезентативность, что позволило обеспечить достоверность статистической обработки.

В действующих нормативных документах для расчета максимальных паводковых расходов традиционно применяется трехпараметрическое гамма-распределение [5]. Однако многочисленные исследования в области гидрологии экстремальных явлений демонстрируют, что при анализе редких событий (с малой обеспеченностью, например 0,1–1%) применение гамма-распределения может привести к недооценке верхних значений. В этом контексте распределение экстремальных значений Гумбеля I типа обеспечивает более корректную аппроксимацию верхних хвостов гидрологических рядов и широко используется в инженерной гидрологии для расчета безопасных режимов эксплуатации гидротехнических сооружений [6, 7].

На основе вышеизложенного, в данном исследовании для определения максимальных расходов воды применено распределение Гумбеля I типа, которое описывается формулой:

$$P_Q = 1 - P(Q) = \exp[-\exp(-y)], \quad (1)$$

где P_Q – вероятность превышения заданного расхода воды; $P(Q)$ – обеспеченность. Параметры распределения определяются как:

$$y = L_N(Q_{\text{рас.}} - b_N); \quad L_N = \frac{\sigma_N}{S_Q}; \quad b_N = Q_{\text{ср.макс.}} + \frac{\bar{y}_N}{L_N}. \quad (2)$$

Здесь $Q_{\text{ср.макс.}}$ – средний максимальный расход воды; S_Q – среднее квадратическое отклонение годовых максимальных расходов; y_N и σ_N – среднее значение и среднее квадратическое отклонение вспомогательной величины, определяемые по формулам:

$$y_m = \ln \left[-\ln \left(\frac{m}{N+1} \right) \right]; \quad \bar{y}_N = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N y_m; \quad \sigma_N = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N y_m^2 - \bar{y}_N^2}. \quad (3)$$

Если наибольший расход воды был зафиксирован за пределами основного ряда наблюдений (Q_N), средний максимальный расход рассчитывается как:

$$Q_{\text{ср.макс.}} = \frac{1}{n} \left(Q_N + \frac{N-1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{\text{макс.}i} \right). \quad (4)$$

Среднее квадратическое отклонение определяется по формуле:

$$S_Q = \sqrt{\frac{(Q_N - Q_{\text{ср.макс.}})^2}{N-1} - Q_{\text{ср.макс.}}^2 + \frac{\sum_{i=1}^n Q_{\text{макс.}i}^2}{n}}. \quad (5)$$

Применение распределения Гумбеля I типа на основе достоверных гидрологических данных позволяет не только точно оценивать экстремальные значения максимальных расходов воды, но и определять вероятностные характеристики их повторяемости, что обеспечивает научно обоснованное проектирование безопасных режимов эксплуатации гидротехнических сооружений.

Результаты исследований и их обсуждение. На основе многолетних гидрологических наблюдений на р. Ахангаран был проведен анализ вероятностного распределения максимальных расходов воды. Согласно расчетам, выполненным с использованием трехпараметрического гамма-распределения, максимальный расход воды с обеспеченностью 0,1% ($Q_{0,1\%}$) составляет $500 \text{ м}^3/\text{с}$.

Однако с целью более точной статистической оценки экстремальных гидрологических рядов было использовано распределение Гумбеля I типа. На основании данного подхода расчеты показали, что максимальный расход воды с обеспеченностью 0,1% составляет $Q_{0,1\%} = 657 \text{ м}^3/\text{с}$.

Полученные результаты показывают, что по сравнению с трехпараметрическим гамма-распределением значение экстремального расхода воды, определенное по распределению Гумбеля I типа, выше на 31–32%. График распределения максимальных расходов воды на р. Ахангаран, полученный с использованием указанных методов, представлен на рис. 1.

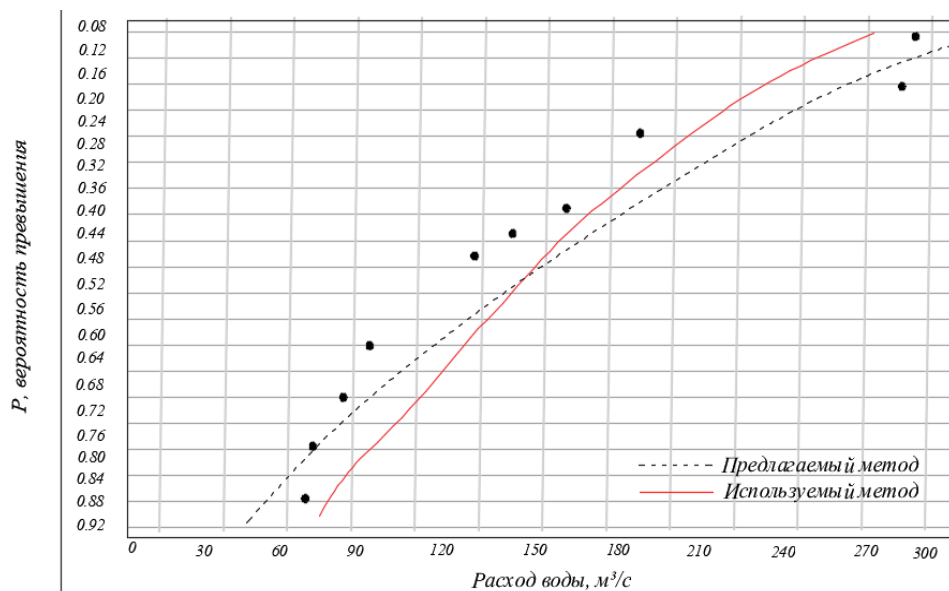


Рис. 1. График распределения максимального расхода воды на р. Ахангаран по распределению Гумбеля I типа.

Предлагаемый метод не требует использования табличных данных для определения расчетного расхода воды и, что особенно важно, не занижает значения максимального расхода при малой обеспеченности. Это позволяет более корректно определять современные максимальные расходы селевых и паводковых вод. В результате возникает необходимость пересмотра пропускной способности водопропускных сооружений водохранилищ с учетом уточненных значений максимальных расходов.

С целью предотвращения перелива через плотину, обеспечения безопасного пропуска необходимого объема воды в период паводка для сооружений и

нижнего бьефа, а также максимально возможного аккумуляции поступающего стока разрабатывается противоаварийная линия регулирования, составной частью которой является линия ограничения наполнения водохранилища.

Перелив водохранилища может произойти в преддверии пика паводка в случае превышения уровня воды в водохранилище отметки, установленной линией ограничения его наполнения.

С целью предотвращения перелива водохранилища необходимо с начала года осуществлять мониторинг отметки уровня воды и сопоставлять ее с отметкой линии ограничения наполнения водохранилища. Данное сопоставление следует проводить в начале и конце года не реже одного раза в месяц, в период паводка – в конце каждой декады, а в период прохождения пика паводка – ежедневно.

Отметка уровня воды в водохранилище не должна превышать отметку линии ограничения его наполнения. В случае превышения необходимо снизить уровень воды до значения, соответствующего линии ограничения наполнения водохранилища. С учетом приведенных выше результатов исследования при обеспечении эффективного использования водных ресурсов водохранилищ на основе данных об изменении стока разрабатываются графики наполнения и сработки водохранилища. При наполнении и сработке водохранилища с соблюдением линий ограничения необходимо обеспечивать, чтобы скорость повышения и понижения уровня воды не превышала установленных нормативных значений [8].

Общие нормативные значения составляют:

- скорость наполнения для верхних слоев – 0,25–0,5 м/сут.;
- для приповерхностного слоя толщиной 2–3 м – 0,05–0,1 м/сут.;
- скорость сработки для высоких уровней – 0,3 м/сут.;
- для средних уровней – 0,5 м/сут.;
- для низких уровней – 1,0 м/сут.

Изменение скорости наполнения и сработки водохранилища допускается только в чрезвычайных ситуациях. На основании вышеизложенных условий для водохранилищ разрабатываются расчетные значения скоростей наполнения и сработки, которые приводятся в таблице.

Расчетные значения скоростей наполнения и сработки водохранилища

Скорость, м/сут.	Отметка уровня верхнего бьефа, м		
	≤ 1020	1020–1050	1050–1070
Наполнение	≤ 1,0	0,3–0,4	0,25–0,3
Сработка	≤ 1,0	0,5	0,3

Использование диспетчерского графика, оперативно разработанного в начале года с учетом всех изменяющихся условий текущего периода, обеспечивает надежное водоснабжение всех потребителей.

В связи с этим на основании полученных результатов для Ахангаранского водохранилища был сформирован диспетчерский график (рис. 2).

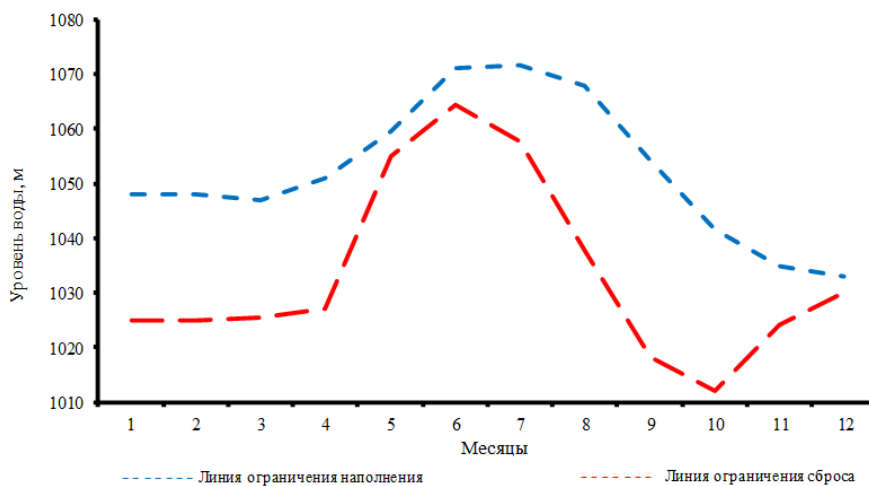


Рис. 2. Линии диспетчерского графика Ахангаранского водохранилища.

В годы с низким уровнем воды в водохранилище перераспределение воды с целью минимизации экономических потерь позволяет уменьшить негативное влияние ограничения подачи воды.

В годы с высоким уровнем воды диспетчерский график обеспечивает возможность предотвращения аварийных ситуаций, за исключением случаев избыточного и бесполезного сброса воды.

Если водохранилище эксплуатируется в соответствии с указанными мероприятиями, то это позволяет предотвращать возникающие неисправности и аварийные ситуации, совершенствовать эксплуатацию водохранилища и обеспечивать эффективное использование водных ресурсов, аккумулируемых в его резервуаре.

Заключение. Результаты проведенного исследования показали, что применение распределения Гумбеля I типа для оценки максимальных расходов воды р. Ахангаран позволяет получить более точные результаты по сравнению с расчетами, выполненными с использованием трехпараметрического гамма-распределения.

Если максимальный расход воды с обеспеченностью 0,1% по трехпараметрическому гамма-распределению составляет $500 \text{ м}^3/\text{с}$, то на основе распределения Гумбеля I типа он равен $657 \text{ м}^3/\text{с}$, что соответствует превышению экстремального расхода на 31–32%.

Для эффективного управления водохранилищами требуется регулярный мониторинг изменения уровня воды, соблюдение нормативных значений скоростей наполнения и сработки, а также выполнение диспетчерского графика. Такой подход позволяет предотвратить переливы водохранилища, обеспечивать рациональное использование водных ресурсов и снижать экологический и экономический ущерб.

Кроме того, в годы с низким уровнем воды возможно разработать планы минимальных потерь за счет перераспределения ресурсов, а в годы с высоким

уровнем воды ограничить избыточные и бесполезные сбросы, что позволяет предотвращать аварийные ситуации.

Диспетчерский график, разработанный на основе результатов исследования, обеспечивает эффективное использование водохранилищ, предотвращение неисправностей и аварий, а также совершенствование их эксплуатации.

Предлагаемый метод не снижает искусственно максимальный расход воды при низкой обеспеченности, что позволяет более точно оценивать селевые и паводковые стоки и разрабатывать безопасные стратегии управления водохранилищами.

Поступила 09.03.2026

Получена с рецензии 31.03.2026

Утверждена 20.04.2026

ЛИТЕРАТУРА

1. Сикан А.В. *Вероятностные распределения в гидрологии. Специальные главы теории и практики гидрологических расчетов (учебник)*. СПб., РГТМУ (2020 г.), 286.
2. Маргарян В.Г., Варданян Т.Г. Методика долгосрочного прогнозирования речного стока бассейна озера Севан. *Ученые записки ЕГУ. Геология и география* **44** (2010), 31–39.
<https://doi.org/10.46991/PYSU:C/2010.44.1.031>
3. Маргарян В.Г., Варданян Т.Г. Особенности формирования речного стока и внутригодового распределения бассейна озера Севан. Научно-практический потенциал географии и его практическое применение. *Матер. научн. конф., посв. 80-летию рождения и 55-летию научно-педагогической деятельности Л.А. Валесяна*. Ереван, Изд-во ЕГУ (2011), 211–223.
4. Fatxulloev A., Gafarova A., Hamroqulov J. Experimental Studies of Determining the Discharge Coefficient of Hydro Gates. *E3S Web of Conferences* **264** (2021), 03050.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126403050>
5. Gumbel E.J. *Statistics of Extremes*. New York, Columbia University Press (1958).
6. Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W. *Applied Hydrology*. New York, McGraw-Hill (1988).
7. Fatxulloev A., Hamroqulov J., Gafarova A. The Discounting Water Influence Estimation on the Results of the Annual Concentration Calculation and Runoff Volume of the Pskem River Biogenous Substances. *E3S Web of Conferences* **264** (2021), 03062.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126403062>
8. Гаппаров Ф.А. Организация безопасной и эффективной эксплуатации водохранилищ. *Журнал AGRO ILM* (2007).

Ջ. Ս. ԽԱՍՐՈՎՈՒԼՈՎ

ԱԽԱՆԳԱՐԱՆԻ ՋՐԱՄԲԱՐԻ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ԵՎ
ԱՆՎՏԱՆԳՈՒԹՅԱՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄՆԵՐԻ ԿԱՏԱՐԵԼԱԳՈՐԾՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հոդվածում ուսումնասիրվել են Ահանգարանի ջրամբարի ջրի հոսքերի կառավարման կատարելագործման մեթոդները և անվտանգության ապահովման մեխանիզմները: Բազմամյա հիդրոլոգիական տվյալների վերլուծության հիման վրա որոշվել է ջրի առավելագույն հոսքերի հավանական բաշխումը՝

կիրառելով երեք պարամետրով գամմա-բաշխումը, ինչպես նաև կատարվել է ստացված արդյունքների համեմատություն Գումբելի I տիպի բաշխման հետ: Հաշվարկները ցույց են տվել, որ 0,1% ապահովվածությամբ ծայրահեղ ջրի հոսքը կազմում է $500 \text{ m}^3/\text{րկ}$ երեք պարամետրով գամմա-բաշխման դեպքում, և $657 \text{ m}^3/\text{րկ}$ Գումբելի մեթոդով, ինչը 31–32%-ով բարձր է: Այս ամենի հիման վրա մշակվել է ջրամբարի շահագործման կարգավարական գրաֆիկ՝ ջրի մակարդակի, ինչպես նաև լցման և բացթողման արագությունների նորմատիվ վերահսկմամբ, ինչը ապահովում է ջրային ռեսուրսների արդյունավետ օգտագործում և անվտանգության բարձրացում արտակարգ իրավիճակներում: Հետազոտության արդյունքները ձևավորում են գիտական հիմք ջրամբարի ռացիոնալ շահագործման և հիդրատեխնիկական կառույցների հուսալիության բարձրացման համար:

J. S. KHAMROKULOV

IMPROVEMENT OF MANAGEMENT MECHANISMS AND ENSURING THE SAFE OPERATION OF THE AKHANGARAN RESERVOIR

Summary

The article investigates methods for improving water discharge management and safety assurance mechanisms of the Akhangaran Reservoir. Based on the analysis of long-term hydrological data, the probabilistic distribution of maximum water discharges was determined using a three-parameter gamma distribution. Additionally, a comparison was conducted with the Gumbel Type I distribution. The calculations showed that the extreme water discharge with a 0,1% exceedance probability is $500 \text{ m}^3/\text{s}$ according to the three-parameter gamma distribution and $657 \text{ m}^3/\text{s}$ according to the Gumbel method, which is 31–32% higher. Based on these results, a reservoir operation rule curve (dispatch schedule) was developed, incorporating regulatory control of water levels and rates of inflow accumulation and release. This approach ensures efficient use of water resources and enhances safety under emergency conditions. The results of the study provide a scientific basis for the rational operation of the reservoir and for improving the reliability of hydraulic structures.