

## 05.23.07 Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

УДК 502/504: 627.8

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-28-33

# БЕЗОПАСНОСТЬ РАБОТЫ ПЛИТ КРЕПЛЕНИЯ НИЖНИХ БЬЕФОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

**СИДОРОВА СВЕТЛАНА АЛЕКСЕЕВНА**, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник

s\_sidorova08@inbox.ru

Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова; 125550, г. Москва, ул. Б. Академическая, 44, стр. 2, Россия

*Цель исследований – изучение условий сохранения устойчивости плит крепления под воздействием гидродинамической нагрузки в нижнем бьефе, обеспечивающих безопасность их работы. Аварийные ситуации на гидроузлах зачастую возникают ввиду потери устойчивости и последующих разрушений плит крепления в нижних бьефах сооружений, являющихся значительно дорогостоящими при их реконструкции. Обеспечение надежности и безопасности работы плит крепления нижних бьефов гидротехнических сооружений тесно связано с устойчивостью их в процессе эксплуатации. Основной причиной разрушений плит крепления водобоя и рисбермы является воздействие на них гидродинамической нагрузки в процессе работы гидротехнического сооружения. Методики расчета конструкций крепления нижнего бьефа, предусматривающие утяжеление плит крепления, полностью не гарантируют их устойчивость и безопасность. Устройства сборных креплений, где отдельные элементы соединены гибкими связями, допускают их незначительные вертикальные и угловые перемещения и создают возможность некоторой деформации крепления без разрушения. Рассмотрен процесс вертикальных перемещений плит крепления в периоде их колебаний под воздействием гидродинамической нагрузки, описанный линейным дифференциальным уравнением второго порядка с переменными коэффициентами и случайной правой частью. Применен метод численного решения уравнения. Выявлен диапазон нагрузок, математическое ожидание которых обеспечивает устойчивое положение плиты крепления с перемещением ( $z \cong 0$ ) и вероятностью отрыва от основания в пределах  $\alpha \cong 0,3...0,5$ . Установлено, что математическое ожидание положения плиты практически не зависит от соотношений собственной частоты колебаний плит крепления и ведущей частоты пульсации нагрузки, от вариации коэффициентов затухания. Результаты исследований позволяют изменить подход к расчетной схеме плит крепления при проектировании, составить прогноз состояния устойчивости плит крепления в зависимости от действующей гидродинамической нагрузки, выявить момент потери устойчивости.*

**Ключевые слова:** гидротехническое сооружение, нижний бьеф, плиты крепления, гидродинамическая нагрузка, динамическая устойчивость

**Формат цитирования:** Сидорова С.А. Безопасность работы плит крепления нижних бьефов гидротехнических сооружений // Природообустройство. – 2022. – № 1. – С. 28-33. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-28-33.

© Сидорова С.А., 2022

Original article

# SAFETY OF OPERATION OF THE FASTENING PLATES OF THE DOWNSTREAM OF HYDRAULIC STRUCTURES

*SIDOROVA SVETLANA ALEKSEEVNA*, candidate of technical sciences, leading researcher

s\_sidorova08@inbox.ru

All-Russian research institute of hydraulic engineering and land reclamation named after A.N. Kostyakov; 125550, Moscow, ul. B. Akademicheskaya, 44 korp. 2. Russia

*The purpose of the research was to study the conditions for maintaining the stability of the fastening plates under the influence of the hydrodynamic load in the downstream, ensuring the safety of its operation. Emergency situations at hydraulic structures often occur due to the loss of stability and subsequent destruction of fastening plates in the downstream of structures, which require significant costs for their reconstruction. Ensuring the reliability and safety of the fastening plates of the downstream of hydraulic structures is closely connected with their stability during operation. The main reason for destruction of the fastening plates of the hearth and apron is the effect of the hydrodynamic load on them during the operation of the hydraulic structure. The methods for calculating the structures of the downstream fastening, providing for the weighting of the fastening plates, do not fully guarantee their stability and safety. The internal structure of prefabricated fasteners, where individual elements are connected by flexible ties, allow their insignificant vertical and angular displacements and create the possibility of some deformation of the fastening without destruction. The process of vertical displacements of fastening plates in the period of their oscillations under the influence of a hydrodynamic load, described by a second-order linear differential equation with variable coefficients and a random right-hand side, is considered. The method of numerical solution of the equation is applied. The range of loads is revealed, the mathematical expectation of which provides a stable position of the fastening plate with displacement ( $z \cong 0$ ) and the probability of separation from the base within  $\alpha \cong 0,3 \dots 0,5$ . It was found that the mathematical expectation of the position of the slab is practically independent of the ratios of the natural vibration frequency of the fastening plates and the driving frequency of the load pulsation, as well as the variation of the damping coefficients. The research results make it possible to change the approach to the design scheme of fastening plates during design, to make a forecast of the state of stability of the fastening plates depending on the current hydrodynamic load, and to identify the moment of loss of stability.*

**Keywords:** hydraulic structure, downstream, fastening plates, hydrodynamic load, dynamic stability

**Format of citation:** Sidorova S.A. Safety of operation of the fastening plates of the downstream of hydraulic structures // Prirodobustrojstvo. – 2022. – № 1. – S. 28-33. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-28-33.

**Введение.** Аварийные ситуации в нижних бьефах водосбросных гидротехнических сооружений происходят, когда условия эксплуатации не выдерживаются и расходятся с проектными условиями. Нарушение правил эксплуатации и ненадлежащее обследование могут привести к повреждению и разрушению гидротехнических сооружений [1]. Однако разрушение плит крепления происходит и тогда, когда условия эксплуатации соблюдаются. Кроме того, устройство крепления нижнего бьефа требует больших финансовых затрат, а его реконструкция зачастую составляет значительную часть от стоимости самого гидротехнического сооружения. При проектировании плитных креплений нижних бьефов водопропускных гидротехнических сооружений основными вопросами являются определение расчетного воздействия водного потока на элементы крепления и расчет элементов на прочность и устойчивость против

этого [2]. Важную роль при этом играет учет реакции подплитного пространства [3].

Практическая ценность выполненных теоретических исследований заключается в том, что предложенная расчетная схема и расчетное условие устойчивости плиты крепления с учетом динамических и статических нагрузок позволили усовершенствовать метод расчета и повысить безопасность работы нижнего бьефа гидротехнических сооружений.

**Материалы и методы исследований.** Для изучения вопроса повышения безопасности работы нижних бьефов гидротехнических сооружений были рассмотрены вопросы динамического взаимодействия плит крепления нижнего бьефа с потоком и основанием, а также методы их расчета. Проведен анализ условий устойчивости плит крепления [4-6]. Проанализированы литературные источники и информационные данные натуральных обследований аварийных гидроузлов

с причинами выхода их из рабочего состояния. Для решения системы уравнений движения плит крепления применялся метод Чудова.

**Результаты и обсуждение.** Плановые размеры плит водобоев и рисберм нижних бьефов гидротехнических сооружений широко варьируются: от 15 до 50 м и более при толщине от 2 до 6 м у крупных гидротехнических сооружений; от 2 до 5 м при толщине от 0,15 до 0,25 м у средних и малых сооружений. При устройстве сборных креплений в нижних бьефах отдельные элементы соединены между собой гибкими связями, исключающими возможность сдвига их по основанию, но допускают их вертикальные и угловые перемещения. Эта конструктивная особенность создает возможность некоторой деформации крепления без его разрушения за счет высотного смещения отдельных элементов друг относительно друга. При определении гидродинамических давлений и нагрузок на обтекаемые поверхности водосбросных сооружений их следует рассматривать как сумму осредненной (по вероятности) и пульсационных составляющих [7]. При воздействии пульсационных нагрузок на плиты водобоев и рисберм присутствует эффект осреднения пульсаций гидродинамического давления по поверхности плит [8].

Одним из путей повышения надежности и безопасности работы креплений, наряду с устранением очевидных причин их разрушения, является совершенствование методики оценки устойчивости плит крепления и проектирования с учетом динамического взаимодействия их с водным потоком и грунтом основания. В существующих расчетных схемах и методах практически не учитываются непрерывные колебания плит крепления при воздействии статической и динамической нагрузки на них, что только и может установить момент потери устойчивости и сформулировать условие устойчивости плит крепления. При этом определяющими считаются «число» стандартов пульсации динамической нагрузки ( $\sigma_p$ ) и вероятность отрыва плит от основания, которые принимаются в расчетах.

Задача исследований заключалась в уточнении существующих условий устойчивости при непрерывном воздействии водного потока и непрерывных перемещениях (в данном случае по вертикальной оси) под воздействием гидродинамической нагрузки.

В предложенной расчетной схеме плиты крепления (рис. 1) рассматривается жесткая массивная плита, лежащая на упругом основании и, кроме собственного веса, подвергающаяся действию осредненных и пульсирующих гидродинамических нагрузок от транзитного водного

потока на свои верхнюю и нижнюю поверхности. Гидравлическая связь потока и под плитной области осуществляется через дренажные отверстия.

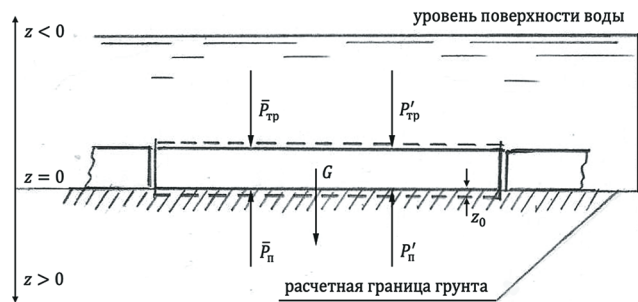


Рис. 1. Расчетная схема плиты крепления  
Fig. 1. Design diagram of the fastening plate

Рассматриваются перемещения плиты, не вызывающие существенной обратной связи «Перемещение-нагрузка» и не влияющие на изменение самой нагрузки в условиях исключения отрыва потока от граней плиты. В таком случае приемлема линейная постановка динамической задачи с применением теории случайных функций и определения суммарной пульсационной нагрузки на плиты крепления [9]. Процесс вертикальных перемещений (колебаний) плиты крепления под действием нестационарной гидродинамической нагрузки может быть описан линейным дифференциальным уравнением (1) второго порядка с переменными коэффициентами и случайной правой частью:

$$\rho_{пл} \delta (\ddot{z} + g) + h_{пл} \dot{z} + k_{г_0} z = (\bar{P}_{тр} - \bar{P}_n) + (P'_{тр} - P'_n), \quad (1)$$

где  $\rho_{пл}$  – плотность материала плиты крепления;  $\delta$  – толщина плиты крепления;  $z$  – вертикальное перемещение плиты крепления;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $h_{пл}$  – коэффициент пропорциональности между силой сопротивления и скоростью перемещения плиты крепления;  $k_{г_0}$  – коэффициент жесткости основания;  $\bar{P}$ ,  $P'$  – осредненная и пульсирующая вертикальные составляющие нагрузки над плитой и под плитой.

После проведенных определенных преобразований (интегрирования обеих частей по площади плиты, введенных обозначений, других преобразований) уравнение (1) может быть представлено в более удобном для решения виде:

$$\ddot{z} + 2\theta\dot{z} + \omega_0^2 z = \frac{(\bar{P} - G_{пл}) + P'}{m_{пл} + m_{пр}}, \quad (2)$$

где  $\theta$  – коэффициент колебания плиты крепления в воде;  $\omega_0$  – собственная частота колебаний плиты крепления в воде;  $G_{пл}$  – собственный вес плиты крепления;  $m_{пл}$  – масса плиты крепления;  $m_{пр}$  – масса присоединенной воды к плите крепления сверху и снизу.

Используется метод численного решения уравнения второго порядка с переменными коэффициентами и случайной реализацией ожидаемой нагрузки. Вследствие того, что пульсирующая сила  $P'$  проявляется как случайный, статистически стационарный процесс во времени, то соответственно и процесс перемещения плиты крепления под воздействием такой нагрузки так же случаен и стационарен.

Процесс реализации нагрузки и перемещения плиты крепления представлен на рисунке 2.

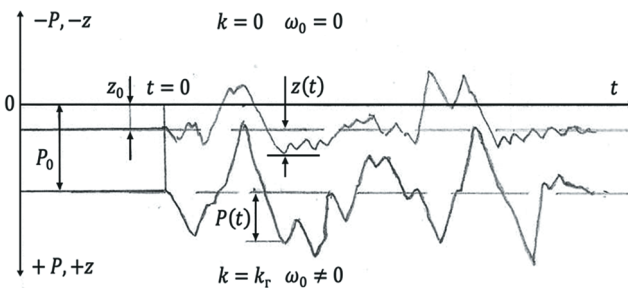


Рис. 2. График реализации нагрузки и перемещения плиты крепления  
Fig.2. Schedule of load implementation and movement of the fastening plate

Соблюдаются условия целесообразно составленной численной процедуры, соответствующего шага по времени и достаточной представительности (временной длины) реализации гидродинамической нагрузки.

Таким образом, математическая постановка задачи решения уравнения движения (колебания) плиты с одной степенью свободы сводится к решению дифференциального уравнения второго порядка с переменными коэффициентами:

$$\ddot{z} + 2\theta\dot{z} + \omega_0^2 z = \frac{P(t)}{m}, \quad (3)$$

здесь  $\theta = \theta(z)$   $\omega_0 = \omega_0(z)$   $m = m(z)$ ,

где  $P(t)$  – суммарная внешняя гидродинамическая нагрузка.

При работе плиты крепления ее колебания происходят в средах с различными коэффициентами жесткости относительно расчетной границы (рис. 1, 2). Поэтому в уравнение (3) вводится нелинейный коэффициент  $\xi(z)$  в виде разрывной функции Гамильтона:

$$\xi(z) = \begin{cases} 0 & \text{при } z < 0 \\ 1 & \text{при } z \geq 0 \end{cases}$$

Уравнение (3) примет следующий вид:

$$\ddot{z} + 2\theta\dot{z} + \omega_0^2 \xi(z)z = \frac{P(t)}{m}, \quad (4)$$

При анализе возможных решений уравнения (4) берется для рассмотрения математическое ожидание его правой и левой частей. Плита колеблется, испытывая перемещение в интервале времени  $T_r$  с вероятностью  $R_r$ , и находится в следующих условиях:

а) в контакте с грунтом основания при  $z > 0$  и  $R_r = 1 - R_0 = 1 - \alpha$ ;

б) в отрыве от грунта основания при  $z < 0$  и  $R_0 = \alpha$ .

Тогда можно записать:

$$\bar{z}(1 - \alpha) + \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} \xi(z)z'(t)dt = 1, 0, \quad (5)$$

где  $T_p$  – период реализации нагрузки.

Плита находится на основании под воздействием осредненной нагрузки ( $M_p$ ). В этом случае математическое ожидание ее положения совпадает со статическим внедрением плиты в грунт. В более характерном случае плита крепления колеблется, периодически отрываясь от основания, причем математическое ожидание  $M_z$  ее координаты  $z$  совпадает с расчетной границей грунта основания, то есть осредненное значение ее перемещения равно нулю ( $\bar{z} = 0$ ). Тогда из (5) следует, что среднее динамическое внедрение плиты в основание должно быть равно ее статическому внедрению под осредненной нагрузкой при весьма существенной интенсивности колебаний плиты. Уравнение движения плиты крепления (4) после преобразования в систему двух уравнений первого порядка в конечно-разностной форме (с подстановкой  $u = \dot{z}$ ) имеет вид:

$$\begin{cases} z = z_0 + u\Delta t \\ u = u_0 + \left[ \frac{1}{m} P(t) - \omega_0^2 \xi(z)z - 2\theta u \right] \Delta t \end{cases} \quad (6)$$

Расчетные зависимости  $\bar{z}$ ,  $\sigma_z$ ,  $\alpha$  нагрузки в относительных величинах к стандарту пульсации ( $M_p / \sigma_p$ ), приведенные на рисунках 3 и 4, получены из численных решений системы уравнений.

Полученные графики свидетельствуют о том, что диапазон нагрузок, при котором математическое ожидание положения плиты крепления приближается к нулю ( $\bar{z} \cong 0$ ), является устойчивым и практически не зависит от соотношений собственной частоты колебаний плиты ( $\omega_0$ ) и ведущей частоты пульсации нагрузки ( $\omega_p$ ), вариации коэффициентов затухания. Верхний и нижний пределы диапазона перемещений и вероятностей отрыва плиты крепления от основания,

в котором выполняется условие  $\bar{z} \cong 0$ , определяются расчетными значениями  $\alpha = 0,5$  и  $\alpha = 0,3$ , что явно следует из расчетного графика.

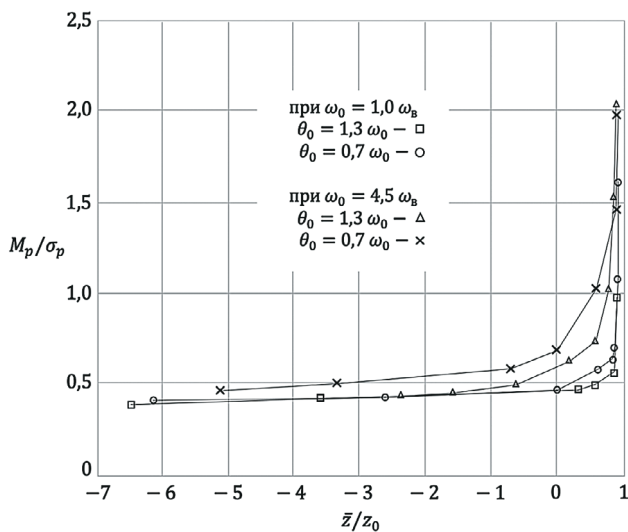


Рис. 3. График зависимости осредненной нагрузки и математического ожидания положения плиты крепления

Fig.3. Graph of the dependence of the average load and the mathematical expectation of the position of the fastening plate

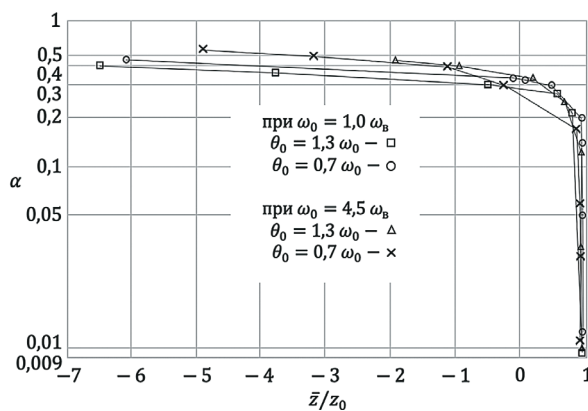


Рис. 4. График зависимости вероятности отрыва плиты крепления от математического ожидания положения плиты

Fig.4. Graph of the dependence of the probability of separation of the fastening plate from the mathematical expectation of the plate position

Аналитические и численные исследования уравнения движения плиты крепления (допускающие перемещения плит [10]), показали, что под действием гидродинамической

нагрузки при  $M_p / \sigma_p \cong 0,5 \dots 0,7$  плита колеблется с математическим ожиданием перемещения  $z_0 \geq z \geq 0$  и с вероятностью отрыва  $\alpha \cong 0,3 \dots 0,5$  от основания.

С уменьшением параметра  $M_p / \sigma_p$  (увеличение составляющей пульсационной нагрузки) математическое ожидание положения плиты стремится к расчетной границе грунта (нулевой плоскости в расчетной схеме  $z \rightarrow 0$ ), амплитуда колебаний возрастает, и вероятность отрыва увеличивается, то есть устойчивость плиты снижается.

Увеличение параметра  $M_p / \sigma_p$  (фактически уменьшение пульсационной составляющей суммарной внешней гидродинамической нагрузки) соответствует тому, что математическое ожидание положения плиты крепления стремится к положению контакта с основанием  $z \rightarrow z_0$ , амплитуда колебаний уменьшается, и вероятность отрыва падает  $\alpha \rightarrow 0$ , то есть запас устойчивости плиты крепления увеличивается. Таким образом, безопасность работы нижнего бьефа гидротехнических сооружений возрастает.

В указанных выше диапазонах нагрузок и перемещений происходит сохранение устойчивости плит крепления в нижнем бьефе гидротехнических сооружений. Потеря устойчивости плит крепления нижнего бьефа происходит в момент, когда под действием нагрузок интенсивность колебаний плит возрастает настолько, что математическое ожидание положения плиты пересекает нулевую плоскость. Условие сохранения устойчивости может быть определено для каждого из исследуемых параметров.

## Выводы

Процесс перемещений (колебаний) плит крепления нижнего бьефа гидротехнических сооружений под действием гидродинамических нагрузок описывается дифференциальным уравнением второго порядка с переменными коэффициентами и случайной правой частью.

Процесс исследования уравнения движения плиты крепления позволил определить диапазон изменений математического ожидания положения плит крепления нижнего бьефа в зависимости от характеристик влияющей нагрузки, составить прогноз ее состояния (положения), выявить момент потери устойчивости.

Установлено, что основным параметром, влияющим на процесс перемещений плит крепления, является отношение осредненной нагрузки к стандарту пульсации.

## References

## Библиографический список

1. Сидорова С.А. Обоснование необходимости разработки основных положений защиты

1. Sidorova S.A. Obosnovanie neobhodnosti razrabotki osnovnyh polozhenij zashchity

гидротехнических сооружений мелиоративного комплекса и единых требований по их безопасной эксплуатации // Научные подходы и технические решения мелиорации земель, водообеспечения и водопользования в АПК: Сб. научных трудов. – М.: Изд-во ВНИИГиМ, 2019. – С. 249-253.

2. Рекомендации по определению гидродинамических нагрузок, воздействующих на плиты водобоев и рисберм водосливных плотин. – Л.: ВНИИГ, 1979. – 52 с.

3. **Буханов В.В.** О динамическом взаимодействии жестких плит крепления нижнего бьефа с подплитной областью // Известия ВНИИГ. Т. 105. – Л.: ВНИИГ, 1974. – С. 268-280.

4. **Черных О.Н., Комельков Л.В.** Гидродинамические нагрузки и устойчивость крепления нижнего бьефа гидротехнических сооружений // XX Конгресс МАГИ. Аннотации докладов. Ч. 1. – М.: ГУГК, 1983. – С. 415.

5. **Юдицкий Г.А.** Пульсация гидродинамической нагрузки на плиты водобоя и рисбермы за многопролетными водосливными плотинами при наличии гасителей энергии // Известия ВНИИГ. Т. 73. – Л.: ВНИИГ, 1963. – С. 155-172.

6. **Юдицкий Г.А.** Пульсация гидродинамической нагрузки на плиты крепления нижнего бьефа за многопролетными водосливными плотинами // Труды Гидропроекта. Сб. 10. – М., 1963. – С. 15-24.

7. Водопропускные гидротехнические сооружения (водобросные, водоспускные и водовыпускные). Правила проектирования. Свод правил. СП 290. 1325800. 2016, п. 4.11. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456074911>.

8. **Юдицкий Г.А.** Учет пульсационных нагрузок при расчете плит водобоя на всплывание // Известия ВНИИГ. Т. 97. – Л.: ВНИИГ, 1971. – С. 232.

9. **Лятхер В.М.** О методике исследования пульсации давления на границе турбулентного потока // Труды координационных совещаний по гидротехнике. Вып. 7. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – С. 533-553.

10. **Юдицкий Г.А., Лятхер В.М.** Гидродинамические нагрузки на элементы крепления нижнего бьефа водосливных плотин // Сборник научных трудов Гидропроекта. № 13. – М.: Гидропроект, 1966. – С. 14-26.

#### Критерии авторства

Сидорова С.А. выполнила теоретические исследования, на основании которых провела обобщение и написала рукопись, имеет на статью авторское право и несет ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию: 18.11.2021 г.

Одобрена после рецензирования 21.01.2022 г.

Принята к публикации 14.02.2022 г.

gidrotehničkih sooruzhenij meliorativnogo kompleksa i edinyh trebovanij po h bezopasnoj expluatatsii // Nauchnye podhody i tehničke resheniya melioratsii zemel, vodoobespecheniya i vodopolzovaniya v APK. Sb. Nauchnyh trudov. – М.: Izd. VNIIGiM, 2019. – S. 249-253.

2. Rekomendatsii po opredeleniyu gidrodinamicheskikh nagruzok, vozdeystvuyushchih na plity vodoboev i risberm vodoslivnyh plotin. – L.: VNIIG, 1979. – 52 s.

3. **Bukhanov V.V.** O dinamicheskom vzaimodejstvii zhestkih plit krepleniya nizhnego bjefa s podplitnoj oblastjyu // Izvestiya VNIIG. t. 105. – L.: VNIIG, 1974. – S. 268-280.

4. **Chernyh O.N., Komelkov L.V.** Gidrodinamicheskie nagruzki i ustojchivost krepleniya nizhnego bjefa gidrodinamicheskikh sooruzhenij. / XX Kongress MAGI. Annotatsii dokladov. ch. 1. – М.: GUGK, 1983. – S. 415.

5. **Yuditskij G.A.** Puljsatsiya gidrodinamicheskoj nagruzki na plity vodoboya i risbermy za mnogoproletnymi vodoslivnymi plotinami pri nalicii gasitelej energii // Izvestiya VNIIG. t. 73. – L.: VNIIG, 1963. – S. 155-172.

6. **Yuditskij G.A.** Puljsatsiya gidrodinamicheskoj nagruzki na plity krepleniya nizhnego bjefa za mnogoproletnymi vodoslivnymi plotinami. // Tr. / Gidroproekt. – Sb. 10. – М., 1963. – S. 15-24.

7. Vodopropusknye gidrodinamicheskie sooruzheniya (vodosbrosnye, vodospusknye i vodovypusknye). Pavila proektirovaniya. Svod pravil, SP 290. 1325800. 2016. – p. 4.11. <https://docs.cntd.ru/document/456074911>

8. **Yuditskij G.A.** Uchet puljsatsionnyh nagruzok pri raschete plit vodoboya na vsplyvanie // Izvestiya VNIIG. t. 97. – L.: VNIIG, 1971. – S. 232

9. **Lyahter V.M.** O metodike issledovaniya puljsatsii davleniya na granitse turbulentnogo potoka // Tr. Koord. soveshchaniya po gidrorehnike. Vyp. 7. – М.: Gosenergoizdat, 1963. – S. 533-553.

10. **Yuditskij G.A., Lyatkher V.M.** Gidrodinamicheskie nagruzki na element krepleniya nizhnego bjefa vodosbrosnyh plotin. Gidroproekt. Sb. nauchnyh trudov № 13. – М.: Gidroproekt, 1966. – S. 14-26.

#### Criteria of authorship

Sidorova S.A. carried out theoretical studies, on the basis of which she generalized and wrote the manuscript. Sidorova S.A. has a copyright on the article and is responsible for plagiarism.

The article was submitted to the editorial office 18.11.2021

Approved after reviewing 21.01.2022

Accepted for publication 14.02.2022