

## Гидротехническое строительство

Научная статья

УДК 627.8:69.05:631.6

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-5-40-46>**ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ КРЕПЛЕНИЯ ИЗ ПЛИТ  
ЗА ВОДОПРОПУСКНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ  
МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ АПК****Черных Ольга Николаевна<sup>1✉</sup>**, канд. техн. наук, доцент;WoSResearcherID: S-2542-2018/; Scopus AuthorID: 57213261727; ORCID:0000-0003-2905-446X; SPIN-код:7757-7969;  
AuthorID: 692667; chernih@rgau-msha.ru**Бурлаченко Алёна Владимировна<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, доцент;WoSResearcherID: HPE-1499-2023; Scopus AuthorID: 57191856023; ORCID:0000-0003-2617-9515, SPIN-код: 3155-2490;  
AuthorID: 1098780; chtara@mail.ru**Бурлаченко Ярослав Юрьевич<sup>1</sup>**, соискатель;

yaroslav.burlachenko@sneak-mail.ru

<sup>1</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия<sup>2</sup> Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ); 125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64, Россия

**Аннотация.** Цель исследований: предоставление информации об оценке условий устойчивости водонасыщенного основания под плитами крепления и самих плит, что позволяет определить оптимальную толщину этого крепления. Рассматриваются основы методологии оценки надежности системы «Бетонные плиты-грунтовое основание» крепления участков нижнего бьефа за водопропускными сооружениями мелиоративных систем. Расчет возможных перемещений горизонтально расположенных плит позволяет оценить их устойчивость и оптимизировать конструкцию крепления и его подплитной полости. Приводятся основные результаты анализа метода оценки поведения крепления и его подплитной полости, а также численного эксперимента, позволившего выявить степень влияния различных факторов на колебание плит и состояние грунта при их вибрации и отрыве для условий сопряжения бьефов в расширяющихся руслах за малопролетными открытыми водосбросами или малоочковыми трубчатыми сооружениями АПК. Прикладная значимость работы заключается в предоставлении информации об оценке условий устойчивости водонасыщенного основания под плитами крепления и самих плит, что позволяет определить оптимальную толщину этого крепления. Это является также важным для дальнейшей работы над созданием надежной системы укрепления дна и склонов водных объектов.

**Ключевые слова:** вибрация и отрыв плит крепления, пульсационные нагрузки, спектральная плотность, дренажный колодец, подплитная полость

**Формат цитирования:** Черных О.Н., Бурлаченко А.В., Бурлаченко Я.Ю. Обеспечение надежности крепления из плит за водопропускными сооружениями мелиоративных систем АПК // Природообустройство.2023. № 5. С. 40-46. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-5-40-46>

© Черных О.Н., Бурлаченко А.В., Бурлаченко Я.Ю., 2023

Scientific article

**ENSURING THE RELIABILITY OF FASTENING OF PLATES BEHIND CULVERTS  
OF RECLAMATION SYSTEMS OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX****Chernykh Olga Nikolaevna<sup>1✉</sup>**, doctor of technical sciences, professorWoSResearcherID: S-2542-2018/; Scopus AuthorID: 57213261727; ORCID:0000-0003-2905-446X; SPIN-код:7757-7969; AuthorID:692667;  
chernih@rgau-msha.ru

**Burlachenko Alyona Vladimirovna**<sup>2</sup>, candidate of technical sciences, associate professor

WoSResearcherID: HPE-1499-2023; Scopus AuthorID: 57191856023; ORCID:0000-0003-2617-9515, SPIN-код: 3155-2490;  
AuthorID: 1098780; chtara@mail.ru

**Burlachenko Yaroslav Yurievich**<sup>1</sup>, applicant;

yaroslav.burlachenko@sneak-mail.ru

<sup>1</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskayast., 49, Russia

<sup>2</sup>Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 125319, Moscow, Leningradsky prospect, 64, Russia

**Abstract.** The purpose of the research is to provide information on the assessment of the stability conditions of the water-saturated base under the fastening plates and the plates themselves, which makes it possible to determine the optimal thickness of this fastening. The basics of the methodology for assessing the reliability of the “concrete slabs-soil foundation” system of fastening sections of the downstream behind the culverts of reclamation systems are considered. Calculation of possible displacements of horizontally located plates makes it possible to evaluate their stability and optimize the design of the fastening and its under-plate cavity. The main results of the analysis of the method for assessing the behavior of the support and its subplate cavity, as well as a numerical experiment that made it possible to identify the degree of influence of various factors on the vibration of the plates and the state of the soil during their vibration and separation for the conditions of conjugation of pools in expanding channels behind low-span open spillways or low-point tubular structures of the agro-industrial complex are presented. The applied significance of the work is to provide information on the assessment of the conditions for the stability of a water-saturated base under the plates and the slabs themselves, which makes it possible to determine the optimal thickness of this mount and is important for further work on creating a reliable system for strengthening the bottom and slopes of water bodies.

**Key words:** vibration and detachment of fastening plates, pulsating loads, spectral density, drainage well, subplate cavity

**Format of citation:** Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Burlachenko Ya.Yu. Ensuring the reliability of fastening of plates behind culverts of reclamation systems of the Agro-industrial complex // Prirodobustrojstvo. 2023. No. P. 40-46. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-5-40-46>

**Введение.** Результаты обследования основных сооружений мелиоративных гидроузлов Нечерноземной зоны РФ показывают, что трубчатые водосбросы и водовыпуски из малых водоемов составляют 76% от общего количества водопропускных сооружений, в том числе в хозяйствах АПК Московской области – 81% [1-3]. Опыт эксплуатации таких сооружений с развитой конструкцией крепления нижнего бьефа, даже при установке гасителей энергии потока на водобое и его расширении с углом больше угла естественного растекания потока – (от 15 до 30°), указывает на недостаточно надежную их работу (рис. 1). Так, частыми являются случаи чрезмерного размыва и разрушения облицовок в пределах рисбермы, что влечет за собой аварии самих сооружений и деформации отводящего канала или русла водотоков на больших расстояниях [3, 5].

Для выбора надежного типа укрепления русел естественных и искусственных водных объектов, а также для общего расчета элементов железобетонного крепления нижнего бьефа гидротехнических сооружений любого назначения необходимо знать распределение гидродинамических нагрузок – как осредненных по времени, так и пульсационных, воздействующих на все

элементы укрепления. Расчет нагрузок на элементы жесткого крепления для такого типа мелиоративных сооружений по методикам, разработанным для высоконапорных водосбросов, дает довольно приближенные результаты [4-8]. Поэтому начиная с 80-х гг. прошлого столетия в гидравлической лаборатории кафедры гидротехнических сооружений МГМИ, а потом и РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, под руководством профессоров, докторов технических наук Н.П. Розанова, В.М. Лятхера, И.С. Румянцева (а в настоящее время – Н.В. Ханова) проводились гидродинамические исследования устройств нижнего бьефа водопропускных сооружений, отводящих русел за ними, каналов и береговых склонов водных объектов [2-12].

**Цель исследований:** предоставление информации об оценке условий устойчивости водонасыщенного основания под плитами крепления и самих плит, что позволяет определить оптимальную толщину этого крепления.

**Материалы и методы исследований.** Для предотвращения потери устойчивости плит крепления, в том числе из железобетона, различных участков водных объектов АПК, приводящей к их разрушению, необходимо создание такого контакта между бетонной плитой и грунтовым

основанием, который разрушался бы только в экстремальных случаях. При этом величина зазора, образующегося между плитой и уложенным под ней фильтром ( $\delta$ ), в нормальных условиях должна быть больше некоторого фиксированного размера, определяемого величиной неровностей швов между плитами ( $\Delta$ ) и характерным диаметром частиц материала фильтра ( $d_{50}$ ) [9]:

$$\delta < 0,5 \max\{\Delta; d_{50}\}. \quad (1)$$

С целью оптимизации конструкции и выбора толщины железобетонного крепления из плоских плит и их подплитной полости применительно к участкам нижнего бьефа за водопропускными сооружениями мелиоративных гидроузлов, с использованием теоретических положений, выдвинутых доктором технических наук профессором В.М. Ляхтером [7], были разработаны критериальные условия надежности и устойчивости системы «Бетонные плиты крепления-водонасыщенное грунтовое основание» [8, 9]. Базируясь на этой методологии, рассмотрели влияние различных факторов на условия устойчивости плит крепления низконапорных малоочковых трубчатых водосборов (рис. 1) с расширяющимся водобойным участком в Подмоскowie (высота плотин – до 15 м, суммарный расход водосбора – до 70 м<sup>3</sup>/с) [12, 14] и выходного оголовка Шамкирского гидроузла на р. Кура (высота плотины – 70 м, пропускаемый расчетный расход – 2750 м<sup>3</sup>/с) при его реконструкции (рис. 2).

Описание экспериментальных установок и конструкций выходного оголовка за водосбором подробно отражено в работах [4, 5, 7, 12]. Учет влияния дополнительной взвешивающей силы, связанной с пульсацией давления, проникающей



Рис. 1. Разрушение крепления за водосборами, обследованными в разные годы на гидроузлах АПК (фото авторов):

- а – деформация крепления нижнего бьефа 3-очкового паводкового водосбора на р. Песоченка п. Степановский МО, 1975 г.;  
 б – состояние нижнего бьефа 2-очкового трубчатого сооружения на ручье Буйгородском Волоколамского района МО после прохождения паводка, 2018 г.; в – разрушение плит рибсермы у д. Маслово (Рассохтинский створ) МО, 2019 г.; г – выходной участок за 2-очковым водосбором Среднего Красногвардейского пруда в ЦАО Москвы, 2021 г.

Fig. 1. Destruction of the fastening behind spillways surveyed in different years at the hydroelectric complexes of the agro-industrial complex (photo by the authors):

- а – deformation of the downstream fastening of a three-point flood spillway on the Pesochenka River, Stepanovsky village, Moscow Region, 1975;  
 б – the condition of the downstream of a 2-point tubular structure on the Buigorodsky stream of the Volokolamsk district of the Moscow region after the passage of the flood, 2018;  
 в – destruction of apron slabs near the village of Maslovo (Rassokhtinsky alignment) of the Moscow Region, 2019; д – exit section behind the 2-point spillway of the Sredniy Krasnogvardeysky pond in the Central Administrative District of Moscow, 2021



Рис. 2. Реконструкция бетонного крепления за 3-очковым водосбором Шамкирского гидроузла, март 2021 г.

Fig. 2. Reconstruction of the concrete fastening behind the three-point spillway of the Shamkirsky hydroelectric complex, March 2021

под плиту через дренажные отверстия или швы, был произведен на основе анализа существующих исследований [8-10].

**Результаты и их обсуждение.** Рассматривалась виртуальная модель жесткой плиты (рис. 3), подплитное пространство которой было изолировано и заполнено обратным фильтром из специально подобранных грунтов либо выполненного из геосинтетики с толщиной, отвечающей отношению:

$$h_{\phi} < c/\omega, \quad (2)$$

где  $c$  – минимальная скорость волн в материале фильтра ( $c \approx 500$  м/с);  $\omega$  – характерная частота колебаний плиты.

Таким образом, рассматривалась подплитная область, связанная с внешним воздействием только через перемещения плиты и течения через отверстия/дренажные колодцы, устраиваемые на водобойном участке в соответствии с рекомендуемыми в литературе схемами [11] или экспериментально обоснованные в результате гидродинамических исследований конкретной модели водосбросного сооружения [12, 14]. Отрыв плиты от поверхности грунта обычно вызывается вибрацией плиты при редких экстремальных выбросах нагрузок, действующих как сверху, так и снизу на плиту крепления. На рисберме разгрузка может происходить для крупных сооружений через специально организованные отверстия или швы между плитами [13]. Фильтрационное сопротивление отверстий/дренажных колодцев обычно велико по сравнению с фильтрационным сопротивлением дренажа под плитой, то есть

$$(\Omega_0 / L) K_0 \ll \left( \frac{Bh_{\phi}}{L_{\phi}} \right) K_{\phi}, \quad (3)$$

где  $K_{\phi}$ ,  $K_0$  – коэффициенты фильтрации материала в дренажных колодцах и материала фильтра;  $\Omega_{\phi}$ ,  $L$  – площадь сечения и длина дренажных колодцев;  $h_{\phi}$ ,  $L_{\phi}$  – длина и ширина фильтра под плитой.

При рассмотрении двух основных сценариев работы крепления дна отводящего участка при экстремальных значениях действующих на них нагрузок: до момента отрыва плиты от основания и после отрыва от него, когда напряжение в «скелете» грунта обратного фильтра становится растягивающим ( $\sigma_z(t) \geq 0$ ), критерием потери устойчивости

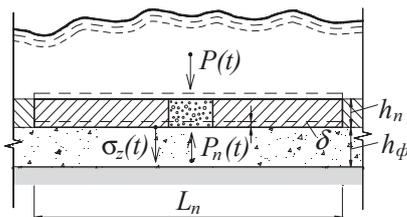


Рис. 3. Установочная схема для оценки устойчивости плит крепления  
Fig. 3. Installation diagram for assessing the stability of fastening plates

плит крепления являлось максимальное значение перемещений  $u_0$  в период  $(t)$ , то есть  $u_{0\max} = \delta$ .

Задача рассматривалась при относительно жестком и маловодопроницаемом грунтовом основании, то есть  $E_{осн} \gg \max\{E_{жс}, E_{\phi}\}$ , где  $E_{осн}$ ,  $E_{жс}$ ,  $E_{\phi}$  – соответственно модули упругости грунта основания, поровой жидкости и материала фильтра. Внешнее воздействие может быть задано осредненной нагрузкой на плиту сверху  $\bar{P}(t)$  и давлением над отверстием/дренажным колодцем  $\bar{P}_0(t)$ :

$$\bar{P}(t) = \langle \tilde{P}(t) \rangle + P(t);$$

$$\bar{P}_0(t) = \langle \tilde{P}_0(t) \rangle + P_0(t). \quad (4)$$

Пульсационные компоненты напряжения в скелете фильтра и подплитного порового давления жидкости –

$$\sigma_z(t) = \tilde{\sigma}_z - \langle \tilde{\sigma}_z \rangle; P_{\Pi}(t) = \tilde{P}_{\Pi} - \langle \tilde{P} \rangle_{\Pi}. \quad (5)$$

До момента отрыва уравнение движения имеет вид:

$$(M + M_{\Pi}) \frac{d^2 u}{dt^2} = [-P(t) - \sigma_z(t) + P_{\Pi}(t)], \quad (6)$$

где  $M$ ,  $M_{\Pi}$  – масса плиты и присоединенная масса воды сверху;  $\Omega$  – площадь плиты;  $u$  – смещение плиты (положительное – вверх).

В стационарном режиме внешнее воздействие представляется в виде функций спектральных плотностей, определяемых либо экспериментальным, либо теоретическим путем. При этом изменение давления под плитой по всему объему полости записывается как

$$d\tilde{P}_{\Pi} = -E_{жс} (dW_{жс} / W_{жс}), \quad (7)$$

где  $W_{жс} = nh_{\phi}\Omega$ ;  $n$  – пористость дренажа и фильтра в дренажном колодце.

За время  $dt$  изменение объема жидкости под плитой составит:

$$dW_{жс} = n \Omega du - nV_0 dt \Omega_0. \quad (8)$$

Полагая, что скорость фильтрации в дренажном колодце равна

$$V_0 = [\tilde{P}_0(t) + z_0 \gamma - \tilde{P}_{\Pi}(t) - z_n \gamma] (K_0 / \gamma L), \quad (9)$$

где  $z_0$  и  $z_n$  – отметки устья дренажного отверстия и основания плиты, можно, вставив в формулу (8) эти, используя еще ряд простых выражений для  $\tilde{P}_{\Pi}$ ,  $\sigma_z$ , определить начальные условия для расчета перемещения плиты в момент отрыва:

$$m \frac{d^3 u}{dt^3} = -P(t) - \sigma_z(t) + \tilde{P}_{\Pi}(t); \quad (10)$$

$$d\tilde{P}_{\Pi}(t)/dt = -\frac{E_{жс}}{h_{\phi}} \left( \frac{du}{dt} \right) + [P_0(t) - P_{\Pi}(t)] / T_0; \quad (11)$$

$$d\sigma_z(t)/dt = \frac{E_{жс}}{h_{\phi}} \cdot \left( \frac{du}{dt} \right). \quad (12)$$

Здесь  $m = (M + M_{np}) / \Omega;$   
 $T_0 = (\gamma L / K_0) \cdot (\Omega / \Omega_0) \cdot (h_{\phi} / E_{жк}).$  (13)

Не учитывая флюктуацию давления над дренажным отверстием и представляя пульсацию давления спектральноно с использованием преобразования Фурье из системы уравнений движения плиты до отрыва, получили спектральные плотности, стандарты и ковариации гидродинамических воздействий потока:

$$\sigma_z = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} S_p(\omega) |\Pi(\omega)| d\omega};$$
 (14)

$$P_i' = \frac{E_{жк}}{E_{\phi}} \sqrt{2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega T_0^2}{1 + \omega^2 T_0^2} S_{\sigma_z}(\omega) d\omega};$$
 (15)

$$\tilde{P}_i'(t) \tilde{\sigma}_z(t) = \frac{E_{жк}}{E_{\phi}} \sqrt{2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega T_0^2}{1 + \omega^2 T_0^2} S_{\sigma_z}(\omega) d\omega};$$
 (16)

$$\frac{du}{dt} = \frac{h_{\phi}}{E_{\phi}} \left( \frac{d\sigma_z}{dt} \right);$$

$$\left( \frac{du}{dt} \right) \sigma_z(t) = 0.$$
 (17)

При этом коэффициенты корреляции –

$$r_{P\sigma_z} = \langle P \cdot \sigma_z \rangle / P' \cdot \sigma_z; \quad (18)$$

$$r_{P_{п\sigma_z}} = \langle P_{п} \cdot \sigma_z \rangle / P'_{п} \cdot \sigma_z. \quad (19)$$

Это позволило найти начальные условия для расчета перемещения плиты в момент отрыва ( $t = t_0, u_0 = 0$ ). При наступлении момента, когда  $\sigma_z \geq 0$ , перемещение плиты после отрыва от основания может быть определено из уравнения:

$$\frac{d^3 u_0}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 u_0}{dt^2} + a_1 a_2 \frac{du_0}{dt} = -a_1 a_2 P(t) -$$

$$- a_1 \frac{dP(t)}{dt} + a_1 a_2 [\tilde{P}_0(t) - \tilde{P}(t) - h(\gamma_a - \gamma)],$$
 (20)

где 
$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{\Omega}{M + M_{np}}; \\ a_2 &= \frac{1}{T_0} = \frac{K_0 \Omega_0 E_{жк}}{\gamma L \Omega h_{\phi}}; \\ a_2 &= \frac{E_{жк}}{nh_{\phi}}. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Таким образом, расчет перемещения  $u_0(t)$  и оценку величины подъема плиты  $\delta$  можно произвести, решив уравнение (20), задаваясь видом  $\tilde{P}(t)$  и  $\tilde{P}_0(t)$  в интервале  $t_0 \leq t \leq (t_0 + \tau)$ . Если конструкция дренажного колодца выполнена специальной, сдерживающей проникание пульсации давления под плиту (например, заполнение колодца пористым бетоном, установка труб

малого диаметра, пробки с сеткой и пр.), то в расчетах пульсацией давления над дренажным отверстием можно пренебречь. В контурах нижнего бьефа Шамкирского гидроузла импульс нагрузки, воздействующей на плиту крепления нижнего бьефа, был принят в виде тригонометрических функций с фазовым сдвигом, обусловленным корреляцией гидродинамических процессов, а максимальное значение  $|P(t)|_{max}$  и  $|P_0(t)|_{max}$  в период  $t_0 < t < (t_0 + \tau)$  при  $\tau$ , равному средней длительности выброса процесса  $\tilde{\sigma}_z(t)$  за уровень  $\tilde{\sigma}_z(t) = 0$ , принималось равным  $|P_i(t)|_{max} = K_A \cdot P_i'$  [10]. Тогда при  $P_0 = 0$  передаточные функции  $\Pi(\omega)$ , необходимые для определения стандартов нагрузки и коэффициентов корреляции, имеют вид:

$$|\Pi|^2 = \frac{\omega^2 T_0 + 1}{\omega^2 T_0^2 \left( \frac{E_{жк} + 1 - \frac{mh_{\phi}}{E_{\phi}} \omega^2}{E_{\phi}} \right)^2 + \left( 1 - \frac{mh_{\phi}}{E_{\phi}} \omega^2 \right)^2};$$
 (22)

$$P_{P_{\sigma_z}} = \frac{\left( \frac{E_{жк} + 1 - \frac{mh_{\phi}}{E_{\phi}} \omega^2}{E_{\phi}} \right)^2 \omega^2 T_0^2 + \left( 1 - \frac{mh_{\phi}}{E_{\phi}} \omega^2 \right)^2}{\left( \frac{E_{жк} + 1 - \frac{mh_{\phi}}{E_{\phi}} \omega^2}{E_{\phi}} \right)^2 \omega^2 T_0^2 + \left( 1 - \frac{mh_{\phi}}{E_{\phi}} \omega^2 \right)^2};$$
 (23)

$$P_{P_{п\sigma_z}} = \frac{\omega^2 T_0^2}{1 + \omega^2 T_0^2}.$$
 (24)

В результате проведения численных экспериментов было установлено, что на передаточные функции  $\Pi(\omega)$  (22)-(24) практически не оказывает влияние изменение величины колеблющейся массы и толщины плиты крепления  $h_n$ . Графические зависимости, демонстрирующие изменение передаточных функций  $|\Pi|^2, P_{P_{\sigma_z}}, P_{P_{п\sigma_z}}$  при варьировании свойств грунта фильтра, толщины плиты защитного покрытия, коэффициентов фильтрации материала фильтра и дренажного колодца, представлены на рисунке 4. Их значения, как и значения стандартов  $\sigma_z', P_{п}'$  и коэффициентов корреляции, определяются в основном параметром  $T_0 = 0,004...84,360$ , зависящим от конструкции дренажных колодцев и свойств подплитной полости (13).

При изменении в обозначенных пределах: толщины плиты  $h_n = (0,2...0,6) h_1$ , толщины фильтра  $h_{\phi} = (0,06...0,12) h_1$ , массы  $m = m_n + m_g = (0,125...0,221) h_1$ , где  $m_n = h_n \cdot \rho_n = 0,24 h_n = (0,048...0,144) h_1$  – масса плиты,  $m_g = 0,25 L_{\rho_g} = 0,077 h_1$  – присоединенная масса воды, величина члена  $(m \omega^2 h_{\phi} / E_{\phi}) \approx (5,4 \cdot 10^{-5} ... 1,1 \cdot 10^{-3}) h_1$  много меньше единицы. Значительное воздухонасыщение поровой жидкости под плитой приводит к росту перемещений плит и параметра  $T_0$ . При  $T_0 > 1$  передаточные функции уже

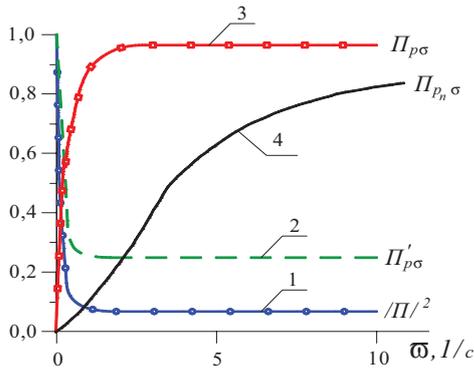


Рис. 4. Виды передаточных функций для определения стандартов нагрузок, напряжений и ковариаций ( $|P|^2$ ,  $P'_{r\sigma}$ ,  $P_{p\sigma}$ ,  $P_{pn\sigma}$ ): 1, 2, 3 – при  $(E_{жс}/E_{ф}) = 2,67$ ,  $E_{жс} = 0,16 \cdot 10^5$  т/м<sup>2</sup>,  $T_0 = 4,22$  с; 4 – при  $(E_{жс}/E_{ф}) = 33,33$ ,  $E_{жс} = 2,0 \cdot 10^5$  т/м<sup>2</sup>,  $T_0 = 0,33$  с

Fig. 4. Types of transfer functions for determination of standards of loads, stresses and covariances ( $|P|^2$ ,  $P'_{r\sigma}$ ,  $P_{p\sigma}$ ,  $P_{pn\sigma}$ ): 1, 2, 3 – при  $(E_{жс}/E_{ф}) = 2,67$ ,  $E_{жс} = 0,16 \cdot 10^5$  т/м<sup>2</sup>,  $T_0 = 4,22$  с; 4 – при  $(E_{жс}/E_{ф}) = 33,33$ ,  $E_{жс} = 2,0 \cdot 10^5$  т/м<sup>2</sup>,  $T_0 = 0,33$  с

при малых значениях частот  $\omega < 2$  с<sup>-1</sup> достигают постоянных значений, а при  $T_0 < 0,1$  коэффициенты корреляции примерно равны  $r_{r_{поз}} = 0$ ,  $r_{p_{оз}} = -1$ . При проникании пульсации под плиту стандарты напряжения в грунте  $\sigma'_z$  и подплитного давления  $P'_n$  увеличиваются более чем в 2 раза.

Перемещение плиты после отрыва главным образом зависит от отношения  $a_2/a_3$ , особенно при  $a_2 > 10^{-1}$  с. При этом определяющим является фазовый сдвиг  $\varphi_p$  от 180 до 270°. При изменении толщины плиты  $h_n$  от  $0,5h_1$  до  $0,2h_1$  и повышении  $K_0$  в 1,5...2 раза отрыв плит резко увеличивается (от значений  $2,5 \cdot 10^{-3}h_1$  до  $0,1 \cdot 10^{-3}h_1$ ).

Установлено, что наиболее эффективным является выполнение дренажного колодца из пористого бетона с гравийным заполнителем ( $\delta_{\max} \leq 2 \cdot 10^{-8}h_1$ ). При этом должно выполняться условие (3) либо должен быть организован вывод дренажа в область с пониженной пульсацией при соблюдении отношения  $K_0/L = \min$ .

Для обеспечения необходимой надежности и эффективности работы трубчатых водосборных сооружений дренажные колодцы на водобое

*Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-29-00928 (URL: <https://rscf.ru/project/23-29-00928/>).*

*The work was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-29-00928, <https://rscf.ru/project/23-29-00928/>.*

#### Список использованных источников

1. Черных О.Н., Волков В.И. Проведение обследований при оценке безопасности гидротехнических сооружений: учебное пособие. М.: ФГБНУ Росинформагротех, 2017. 180 с.
2. Altunin V.I., Chernyh O.N., Burlachenko A.V. Hydraulic Resistance of Corrugated Metal Culvert Pipes

#### References

1. Chernykh O.N., Volkov V.I. Conducting surveys in assessing the safety of hydraulic structures: study guide. M.: FGBNU Rosinformagrotech, 2017. 180 p.
2. Altunin V.I., Chernyh O.N., Burlachenko A.V. Hydraulic Resistance of Corrugated Metal Culvert Pipes

рекомендуется располагать в местах пониженного осредненного и пульсационного давления – непосредственно за гасителями энергии. Они должны быть удалены относительно друг друга на расстояние, равное для круглых труб 1-2 d (для прямоугольных – высоты). При наличии гасителей энергии потока дренажные отверстия соответственно не более  $0,07d$  располагаются на расстоянии  $0,1d$  за гасителем первого ряда и отстоят друг от друга на  $0,85d$ . Швы между оголовком труб и раструбом, а также между плитами водобоя – водонепроницаемые. Разгрузка основания монолитной части рисбермы производится через дренажные колодцы, располагаемые в шахматном порядке в два ряда через  $2d$ . Под всеми плитами крепления устанавливается обратный фильтр, изолированный от приточности из отводящего канала. Дренажные колодцы для защиты от динамических воздействий потока закрываются крышкой специальной конструкции.

#### Выводы

Для оптимизации конструкции железобетонного крепления и его подплитной полости расширен и апробирован метод оценки колебаний и устойчивости плит крепления, позволяющий рассчитать напряжения в грунте фильтра под плитой, возникающие от вибрации плиты, оценить величину отрыва плиты от грунта и ее минимальную толщину.

Установлено, что для предотвращения отрыва плит от основания следует при устройстве плит с отверстиями назначать минимальное отношение  $K_0/L$  и значительное превышение фильтрационного сопротивления дренажных отверстий над сопротивлением дренажа под плитой, устройство которого является обязательным.

Предложенные конструктивные решения крепления нижнего бьефа в расширяющихся руслах, методика определения нагрузок на его элементы и разработанный метод оценки устойчивости крепления были применены при проектировании и реновации целого ряда типизированных сооружений мелиоративного назначения.

with Elevated Abrasive Resistance. Power Technology and engineering, 2016, V. 50, Issue 4, pp. 385-390.

3. **Черных О.Н., Бурлаченко А.В.** К вопросу оценки условий эксплуатации локализации аварийной ситуации на прудах подмосковных рыбхозов. Сборник статей IV Международного научно-исследовательского конкурса. Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2023. С. 74-80.

4. **Розанов Н.П., Кавешников Н.Т.** и др. Устройства нижнего бьефа водосбросов: М.: Колос, 1984. 269 с.

5. **Chernykh O.N., Komelkov L.V.** Hydrodynamic loads and stability of the lower-pool apron of hydraulic structures. Hydrotechnical Construction, 1983. Vol. 17(8). Pp. 410-416.

6. **Burlachenko A.V., Chernykh O.N., Khanov N.V. and Bazarov D.R.** Damping of Increased Turbulence Beyond a Deep and Relatively Short Spillway Basin. AIP Conference Proceedings. 2023. 2612. 020029. <https://doi.org/10.1063/5.0116112> Published Online: 15 March 2023.

7. **Черных О.Н., Бурлаченко А.В., Бурлаченко Я.Ю.** Экспериментальные и аналитические исследования нагрузок на элементы крепления за водосбросами водных объектов АПК // Природообустройство. 2023. № 4. С. 59-66.

8. **Лятхер В.М.** Турбулентность в гидросооружениях. М.: Энергия, 1968. 297 с.

9. **Лятхер В.М., Халтурина Н.В.** Динамические нагрузки на водобой и оценка устойчивости крепления // Труды координационных совещаний по гидротехнике. Вып. 116. Л.: Энергия, 1977. С. 44-55.

10. **Лятхер В.М., Черных О.Н.** Оценка устойчивости креплений нижнего бьефа водосбросных сооружений // Гидротехника и мелиорация. 1980. № 2. С. 25-30.

11. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: справочное пособие / Д.Д. Лаппо. М.: Энергоатомиздат, 1988. 624 с.

12. **Черных О.Н.** Пространственно-временные корреляции и функции спектральной плотности пульсации давления на плитах крепления нижнего бьефа трубчатых сооружений // Гидротехнические сооружения, основания и фундаменты, инженерные конструкции: сборник научных трудов. М.: МГМИ, 1982. С. 158-167.

13. **Волков В.И., Черных О.Н., Журавлёва А.Г., Румянцев И.С., Алтунин В.И.** Открытые береговые водосбросы. М.: МГУП, 2012. 244 с.

14. **Obidov B., Vokhidov O., Shodiev B., Ashirov B., Sapaeva M.** Hydrodynamic loads on a water drain with cavitation quenchers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 883. Pp. 012011. DOI: 10.1088/1757-899x/883/1/012011

#### Критерии авторства / Authorship criteria

Черных О.Н., Бурлаченко А.В., Бурлаченко Я.Ю. выполнили теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Черных О.Н., Бурлаченко А.В., Бурлаченко Я.Ю. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат. All the authors made an equal contribution to the preparation of the publication

#### 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 05.05.2023

Поступила после рецензирования / Revised 18.08.2023

Принята к публикации / Accepted 18.08.2023

with Elevated Abrasive Resistance. Power Technology and engineering, 2016, V. 50, Issue 4, pp. 385-390.

3. **Chernykh O.N., Burlachenko A.V.** On the issue of assessing the operating conditions and localization of an emergency situation on the ponds of fish farms near Moscow. Collection of articles of the IV International Research Competition. Petrozavodsk: MTsNP "New Science", 2023. 475 p. P. 74-80.

4. **Rozanov N.P., Kaveshnikov N.T.** and others. Devices for the downstream spillway. M.: Kolos, 1984. 269 p.

5. **Chernykh O.N., Komelkov L.V.** Hydrodynamic loads and stability of the lower-pool apron of hydraulic structures. Hydrotechnical Construction, 1983. Vol. 17(8). P. 410-416.

6. **Burlachenko A.V., Chernykh O.N., Khanov N.V. and Bazarov D.R.** Damping of Increased Turbulence Beyond a Deep and Relatively Short Spillway Basin. Cite as: AIP Conference Proceedings 2612, 020029 (2023); <https://doi.org/10.1063/5.0116112> Published Online: 15 March 2023.

7. **Chernykh O.N., Burlachenko A.V.** Burlachenko, Y.Y. Experimental and analytical studies of loads on fastening elements behind the spillways of water bodies of the agro-industrial complex. Prirodoobustroystvo, 2023, No. 2, P. 59-66.

8. **Lyakher V.M.** Turbulence in hydraulic structures. M: Energy, 1968, 297 p.

9. **Lyakher V.M., Khalturina N.V.** Dynamic loads on the water break and assessment of fastening stability. Proceedings of coordination meetings on hydraulic engineering. Leningrad: Energy, 1977, no. 116. P. 44-55.

10. **Lyakher V.M., Chernykh O.N.** Evaluation of the stability of the downstream fastenings of the spillways. Hydraulic engineering and melioration No. 2, 1980. P. 25-30.

11. Hydraulic calculations of spillway hydraulic technical structures: a reference manual / Lappo D.D. M.: Energoatomizdat, 1988. 624 p.

12. **Chernykh O.N.** Spatial-temporal correlations and functions of the spectral density of pressure pulsations on the plates for fastening the downstream of tubular structures // Collection of scientific papers. Hydraulic structures, bases and foundations, engineering structures. M.: MGMI, 1982. P. 158-167.

13. **Volkov V.I., Chernykh O.N., Zhuravleva A.G., Rumyantsev I.S., Altunin V.I.** Open coastal spillways: textbook. M.: FGBOU VPO MGUP, 2012, 244 p.

14. **Obidov B., Vokhidov O., Shodiev B., Ashirov B., Sapaeva M.** Hydrodynamic loads on a water drain with cavitation quenchers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 883. Pp. 012011. DOI:10.1088/1757-899x/883/1/012011

Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Burlachenko Ya.Yu. carried out theoretical and experimental studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript.

Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Burlachenko Ya.Yu. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.