

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-2-57-62>

УДК 626/627: 627.157:532.54



ОЦЕНКА СТАДИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НАНОСОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВОЛНОВОГО ПОТОКА НА ЭЛЕМЕНТЫ РУСЛА ВОДНОГО ОБЪЕКТА АПК

О.Н. Черных^{1✉}, А.В. Бурлаченко², Я.Ю. Бурлаченко¹

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, Россия; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства им. А.Н. Костякова, Россия

² Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ); 125319, г. Москва, Ленинградский пр-кт, 64, Россия

Аннотация. Цель исследований – определение в лабораторных условиях величины и законов распределения донных скоростей волнового потока, при которых наступают различные стадии перемещения частиц и формирования рифелей в зоне пляжных откосов водных объектов АПК. Приведены результаты исследований скоростей, характеризующих режимы движения наносов в волновом потоке, воздействующем на незакрепленные откосы и придонные участки мелководной зоны водоемов и водотоков. Рассматривается влияние искусственной турбулизации потока на характерные скорости потока, в том числе волновой скорости на параметры донных рифелей. Осуществлен анализ влияния искусственной турбулизации на скорости перемещения наносов, даны рекомендации по определению неразмывающей скорости волнового потока при ее отсутствии. Представлена зависимость для определения высоты рифелей. Установлено, что скорости на гребне рифеля возрастают не более чем в 1,7 раза по сравнению со скоростью на ровном дне приустьевой зоны крупного водного объекта.

Ключевые слова: наносы, волновой поток, скорости, воздействие на речные сооружения и берега

Формат цитирования: Черных О.Н., Бурлаченко А.В., Бурлаченко Я.Ю. Оценка стадии перемещения наносов при действии волнового потока на элементы русла водного объекта АПК // Природообустройство. 2024. № 2. С. 57-62. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-2-57-62>

Original article

ASSESSMENT OF THE STAGE OF SEDIMENT MOVEMENT UNDER THE ACTION OF WAVE FLOW ON THE ELEMENTS OF THE CHANNEL OF A WATER BODY IN THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

O.N. Chernykh^{1✉}, A.V. Burlachenko², Y.Y. Burlachenko¹

¹ Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya str., Moscow, 127434, Russia; A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction; Russia

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

Abstract. The purpose of the work is to determine, in laboratory conditions, the magnitude and laws of distribution of bottom wave flow velocities, at which various stages of particle movement and riffle formation occur in the area of beach slopes of water bodies of the agro-industrial complex. The results of studies of velocities characterizing the regimes of sediment movement in a wave flow acting on loose slopes and bottom areas of the shallow zone of reservoirs and streams are presented. The influence of artificial flow turbulization on characteristic flow speeds, including wave speed on the parameters of bottom riffles, is considered. An analysis of the influence of artificial turbulization on the speed of sediment movement is given and recommendations are given for determining the non-erosive speed of the wave flow in its absence. A dependence is presented for determining the height of the riffles. It has been established that the velocities on the riffle crest increase by no more than 1.7 times compared to the speed on the flat bottom of the near-shore zone of a large water body.

Keywords: sediments, wave flow, velocities, impact on river structures and banks

Format of citation: Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Burlachenko Ya.Yu., Assessment of the stage of sediment movement under the action of a wave flow on the elements of the channel of a water body of the agro-industrial complex // Prirodoobustrojstvo. 2024. No 2. P. 57-62. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-2-57-62>

Введение. При проектировании берегозащитных мероприятий, предназначенных для обеспечения нормальной работы, как объектов рекреации АПК, так и транспортной магистрали любого класса, проходящей в прибрежной зоне, особое внимание обращается на создание и расширение естественного пляжа на побережье водного объекта. Такой подход объясняется тем, что эффективность берегозащитных мероприятий находится в прямой зависимости от наличия пляжа, который выполняет одновременно и функции волногасителей. Если естественный пляж отсутствует, то принимаются меры по его искусственному образованию путем доставки нерудных материалов из карьеров. Для этих же целей может быть использован щебень, полученный дроблением горных пород.

Проектирование берегозащитных сооружений осуществляется на основе комплекса изысканий, одними из целей которых являются установление динамики пляжа, направления господствующего перемещения наносов и выявление границ региона, в пределах которого происходят зарождение и разгрузка потока наносов. При проектировании особое внимание уделяется решению вопросов устранения возможных отрицательных последствий строительства гидротехнических сооружений (ГТС) для соседних участков берега и предотвращения нарушений сплошности вдоль берегового потока наносов. В последние годы в связи с усилением требований по охране окружающей природы большое значение приобрела проблема сохранения естественного ландшафта побережья, особенно в зонах, используемых для отдыха.

Эффективное решение этой проблемы может быть достигнуто на основе архитектурно-ландшафтного проектирования [1-5]. Конструкции береговых ГТС и их компоновка определяются очертанием береговой линии, рельефом, крутизной и геологическим строением подводного склона, а также характеристиками поля

волнения. При проектировании берегозащитных ГТС учитываются нагрузки, обусловленные фронтально и косо подходящими волнами к берегу, высота наката разрушенных волн, глубина размыва волнами грунтовых оснований, ледовые нагрузки и другие воздействия.

Цель исследований: определение в лабораторных условиях величины и законов распределения донных скоростей волнового потока, при которых наступают различные стадии перемещения частиц и формирования рифелей – донной мелкой волновой ряби: колебание отдельных частиц (U_{on}), срыв некоторых частиц, массовый срыв отдельных частиц (U_{oc}), образование рифелей (U_{op}), перемещение рифелей (U_{od}).

Материалы и методы исследований. Геометрические размеры пляжей устанавливаются с учетом режима уровней и волнения, характерного для данного участка берега. Ширина надводной части пляжа принимается равной длине свободного пробега потока от разрушенной волны по пляжу [1-3]. В некоторых случаях для укрепления от размыва очень пологих (с уклоном менее 1:10) пляжных откосов подпорных грунтовых ГТС водных объектов АПК применяется посадка влаголюбивых кустарников в зоне переменного уровня (рис. 1). Волна, набегая на полосу растительности (ива и т.п.), разбивается о стволы кустарника и теряет свою энергию, вместе с тем уменьшается как скорость скатывания воды при обратном движении волны, так и ее размывающая способность.

Кинематическая структура потока и режимы движения наносов в волновом потоке, воздействующем на берег водного объекта АПК с естественным либо искусственным пляжем (рис. 1, 2), изучены недостаточно [6].

Для характеристики начальной стадии перемещения отдельных частиц размываемого грунта под воздействием волн вводится обычно понятие не размывающей скорости на высоте выступов шероховатости [6-9].

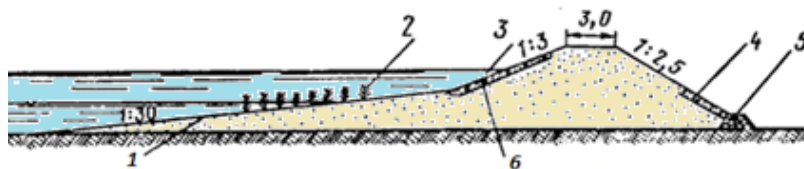


Рис. 1. Поперечное сечение дамбы на водном объекте АПК с укреплением откоса посадкой кустарника:

1 – пляжный откос; 2 – посадка кустарника; 3 – крепление гравием; 4 – наклонный дренаж; 5 – дренажная призма; 6 – отсыпка крепления из камня

Fig. 1. Cross-section of the dam on the water body of the agro-industrial complex with slope reinforcement by planting shrubs:

1 – beach slope; 2 – planting shrubs; 3 – gravel fastening; 4 – sloping drainage; 5 – drainage prism; 6 – stone fastening filling

Экспериментальные исследования проводились в стеклянном лотке длиной 10 м, шириной 55 см и высотой 60 см [10-14]. Волны создавались щитовым волнопродуктором. Средний диаметр частиц отсеянного люберецкого песка, из которого было сложено размываемое дно, составлял $d = 0,20$ мм. Диапазон изменения высоты волн при наполнении лотка 15 см составлял от 13 до 75 мм, а донных волновых скоростей $U_{дон}$ – от 4 до 18 см/с. Эти скорости получены для волнового потока с периодом $\tau = 0,91$ с, длиной волны $\lambda = 1,05$ м [11]. Безразмерный параметр $\kappa H = 0,88$ ($\kappa = 2\pi / \lambda$ – волновое число, H – глубина воды) характеризует мелководную зону. Процесс образования рифелей рассматривался на предварительно выровненном и проницательном дне.

Кроме того, было исследовано влияние искусственной турбулизации на не размывающие скорости $U_{дон}$. Для волнового потока эксперименты проводились при скорости не более $2U_{дон}$. Донную волновую скорость определяли на ровном дне с помощью кино съемки, снимая помещенные на дне лотка пластмассовые шарики диаметром 2 мм. Параметры волн (λ и h) определяли с помощью фотосъемки профилей волн.

Результаты и их обсуждение. На ровной поверхности при донной скорости волнового потока $U_{\delta} \approx 9$ м/с наблюдалось колебание отдельных мелких частиц, что соответствует понятию не размывающей скорости $U_{дон}$ (табл.).

При возрастании скорости до $(1,0...1,2)U_{дон}$ на ровной поверхности дна происходил срыв отдельных частиц. При скорости $(1,2...1,4)U_{дон}$

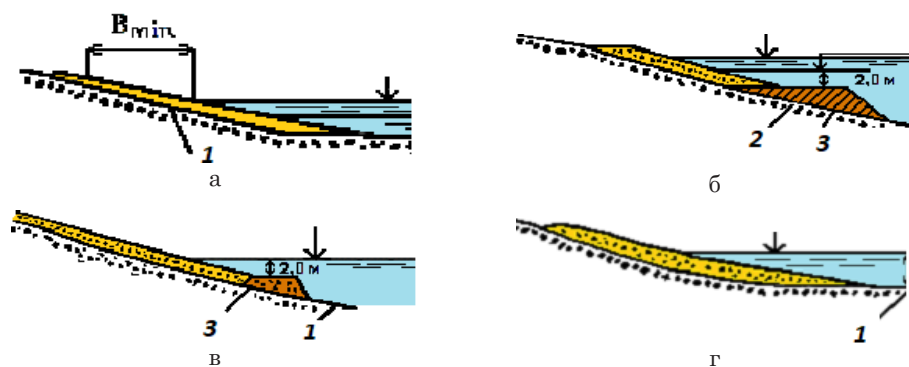


Рис. 2. Эскизы сечения гидротехнического сооружения с естественным подводным склоном: а, б – непроницаемые и сквозные бунты; в – подводный волнолом с траверсами распластанного профиля;

г – сооружения для усиления мысовых эффектов; 1 – естественный подводный склон;

2 – подводный банкет; 3 – подводный волнолом распластанного профиля

Fig. 2. Sketches of the cross-section of a hydraulic structure with a natural underwater slope:

a, b – impermeable and through bunkers; c – underwater breakwater with traverses of flattened profile;

d – structures to enhance cape effects; 1 – natural underwater slope; 2 – underwater banquet;

3 – underwater breakwater with a flattened profile

Таблица. Характеристика движения наносов руслового и волнового потоков

Table. Characteristics of the sediment movement of channel and wave flows

Режим движения наносов Sediment movement mode	Фаза движения наносов Sediment movement phase	Не размывающая средняя скорость руслового потока Non-eroding average channel flow velocity	Не размывающие скорости волнового потока Non-eroding bottom velocities of wave flow	
			без искусственной турбулизации without artificial turbulization	с искусственной турбулизацией with artificial turbulization
I	Колебание отдельных частиц Oscillation of individual particles	Не размывающая U_n Non-eroding U_n	$U_{дон}$	$U'_{дон} = (0,5...0,6) U_{дон}$
II	Сдвиг отдельных частиц Individual particles shift	$U_o = (1,0...1,3) U_{дон}$	$U_{до} = (1,0...1,2) U_{дон}$	$U'_{до} = (0,6...0,8) U_{дон}$
III	Массовый отрыв частиц Particles mass separation	Срывающая Breaking up $U_c = (1,2...1,5) U_{дон}$	$U_{dc} = (1,2...1,4) U_{дон}$	$U'_{dc} = (0,7...0,9) U_{дон}$
IV	Образование рифелей Formation of riffles	$U_p = (1,3...1,8) U_{дон}$	$U_{dp} = (1,4...1,8) U_{дон}$	$U'_{dp} = (0,9...1,3) U_{дон}$
V	Движение рифелей Movement of riffles	-	$U_{dn} = (1,8...2,0) U_{дон}$	$U'_{dn} = (1,3...1,8) U_{дон}$

наблюдался уже массовый срыв частиц, что соответствует понятию срывающей скорости. Рифеля образовывались при скорости $U_{\partial} = (1,4 \dots 1,8) U_{\partialн}$. Сформировавшаяся рифельная поверхность имела в плане прямые линии гребней, перпендикулярные лучу волнения.

Следует отметить, что во время экспериментов для руслового потока наблюдалось образование рифельных гряд, поэтому в таблице режим движения рифелей V не выделен. При скорости $(1,8 \dots 2,0) U_{\partialн}$ начиналось движение рифелей и наблюдалось искривление гребней рифелей в плане.

Для исследования влияния искусственной турбулизации потока на ровной поверхности дна по всей ширине лотка была проделана треугольная канавка глубиной 1 см и шириной по верху 2 см. При донной скорости $U_{\partial} \approx 5$ см/с на передней и задней кромках канавки наблюдалось колебание отдельных наиболее мелких частиц, при этом не размывающая донная скорость при искусственной турбулизации составляла $U'_{\partialн} \approx 5$ см/с и, как следствие, отношение между $U'_{\partialн} / U_{\partialн}$ составляло $0,5 \dots 0,6$.

При увеличении скорости до $(0,6 \dots 0,8) U_{\partialн}$ на кромках канавки наблюдался сдвиг отдельных частиц. Дальнейшее возрастание донной скорости до $(0,7 \dots 0,9) U_{\partialн}$ вызывало массовый срыв частиц на кромках канавки со срывающей скоростью $U'_{\partialс}$. При увеличении скорости до $(0,9 \dots 1,3) U_{\partialн}$ на передней и задней кромках канавки образовывалось по рифелю, то есть донная волновая скорость, при которой наблюдается образование рифелей, составляла $U'_{\partialр} = (0,9 \dots 1,3) U_{\partialн}$.

Дальнейшее возрастание донной скорости более $U'_{\partialр}$ приводило к распространению рифелей в обе стороны от канавки и к началу движения рифелей при $U_{\partial} = (1,3 \dots 1,8) U_{\partialн}$.

Из данных таблицы следует, что искусственная турбулизация оказывает более

значительное влияние на начальные скорости перемещения наносов от волнового воздействия $U'_{\partialн} = (0,5 \dots 0,6) U_{\partialн}$ по сравнению с русловым потоком $U'_{\partialн} = 0,7 U_{\partialн}$. Без искусственной турбулизации не размывающие донные скорости руслового и волнового потоков совпадают с точностью до $5 \dots 10\%$, поэтому для определения не размывающих скоростей волнового потока можно воспользоваться рекомендациями, изложенными в работе [7].

По мере возрастания скоростей рифельной фазы движения наносов высота h и шаг λ рифелей увеличиваются (рис. 3а). Эту зависимость для h_p можно аппроксимировать уравнением:

$$h_p = 2,48 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda_{\partial} \cdot U_{\partialн} (gd)^{-0,5}, \quad (1)$$

где $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения.

Анализ графических зависимостей показал (рис. 3б), что отношение λ_p / h_p не зависит от скорости. При потенциальном обтекании потоком гребня рифеля на его гребне скорость возрастает в 3 раза по сравнению со скоростью на ровном дне [5]. Это объясняется срывом струй с вершин рифелей и возникновением вихрей на подветренном склоне рифеля. Измерения во время проведения экспериментов донных скоростей на ровном дне и на гребне рифеля с помощью электромеханического датчика скорости показали, что скорости на гребне рифеля возрастают только в $1,5 \dots 1,6$ раза по сравнению со скоростью на ровном дне.

Сравнение донных волновых скоростей $U_{\partialн}$, вычисленных по известной формуле Буссинеска [8, 15–17], с измеренными указали на необходимость ввода поправочного коэффициента [6, 16], $n_c = U_{\text{ист}} / U_{\text{теор}}$ (рис. 4), где $U_{\text{ист}}$ – истинная скорость; $U_{\text{теор}}$ – скорость, вычисленная по формуле Буссинеска [16]:

$$U_{\partialн} = \pi \cdot h \cdot (\pi \lambda / g)^{-0,5} (Sh \cdot 4\pi \cdot H / \lambda)^{-0,5}, \quad (2)$$

где $\pi = 3,14 \dots$; Sh – число Струхала.

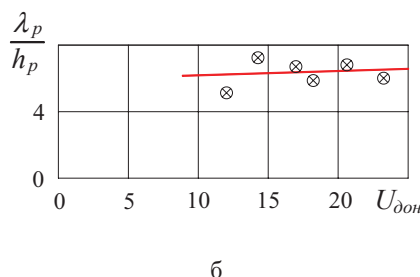
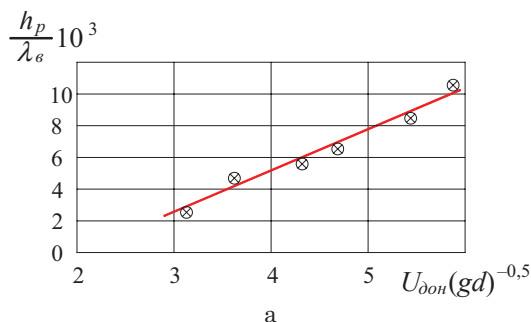


Рис. 3. Экспериментальные зависимости для определения параметров рифелей:

$$а - h_p / \lambda_{\partial} = f(U_{\partialн} / \sqrt{gd}); б - \lambda_p / h_p = f(U_{\partialн})$$

Fig. 3. Experimental dependencies for determining the parameters of riffles:

$$а - h_p / \lambda_{\partial} = f(U_{\partialн} / \sqrt{gd}); б - \lambda_p / h_p = f(U_{\partialн})$$

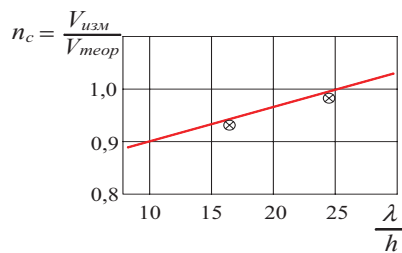


Рис. 4. Сравнение данных эксперимента с рассчитанными по формуле (2)

Fig. 4. Comparison of the experiment data with those calculated by formula (2)

Незначительный разброс точек на рисунке 4 можно объяснить влиянием начальных и граничных условий на поправочный коэффициент.

Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-29-00928. <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. Игнатов Е.И., Исаев В.С. Береговые процессы: мониторинг и инновационные комплексные исследования: учебное пособие. Севастополь: Колорит, 2018. 251 с.
2. Черных О.Н., Ханов Н.В., Бурлаченко А.В. Берегоукрепительные конструкции водных объектов: учебник. Ч. 2. М.: РГАУ-МСХА, 2020. 185 с.
3. Черных О.Н., Бурлаченко А.В. Особенности изменения профиля склона пойменных дамб и берегов водных объектов при волновом воздействии // Природообустройство. 2023. № 2. С. 81-85.
4. Черных О.Н., Бурлаченко А.В. Пути решения проблем Имеретинской бухты // Вестник учебно-методического объединения по образованию в области природообустройства и водопользования. 2021. № 23. С. 33-39.
5. Шуляк В.А. Некоторые вопросы взаимодействия волнового потока с деформированным дном при малых скоростях // Труды Института океанологии. 1961. Т. 48.
6. Масс Е.И. Исследование не размывающихся скоростей волнового потока для несвязных и связных грунтов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тбилиси, 1968. 25 с.
7. Мирцхулава Ц.Е. Размыв русл и методика оценки их устойчивости. М.: Колос, 1967. 179 с.
8. R.A. Bagnold. The movement by waves, small scale experiments. I. Inst. Civil Eng. 1947. V. 27, № 4.
9. Пышкин Е.А., Цайтц Е.С., Сокольников Ю.Н. Регулирование вдоль берегового потока наносов. Киев: Наукова думка, 1972.
10. Черных О.Н., Бурлаченко А.В. Особенности изменения профиля склона пойменных дамб и берегов водных объектов при волновом воздействии // Природообустройство. 2023. № 2. С. 81-85.
11. Черных О.Н., Бурлаченко А.В. Оценка основных параметров волнового воздействия на пологие откосы берегов крупных водных объектов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19, № 1. С. 110-116. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-1-110-116>.

Выводы

1. Не размывающие донные скорости волнового потока $U_{дн}$ без искусственной турбулизации можно определить по рекомендациям работы [7]. Для учета искусственной турбулизации можно воспользоваться данными таблицы, полученными на основании проведенных экспериментов.
2. Донная волновая скорость влияет на геометрические характеристики λ и h рифелей, которые можно определить по зависимости (1), но пологость рифеля, характеризующаяся отношением λ_p / h_p , не зависит от донной скорости.
3. Донная скорость возрастает на гребне рифеля в 1,6...1,7 раза по сравнению с соответствующей скоростью на ровном дне.

References

1. Ignatov E.I., Isaev V.S. Coastal processes: monitoring and innovative comprehensive research. – Sevastopol: ECOSI-Hydrophysics, 2018. 246 p.
2. Chernykh O.N., Khanov N.V., Burlachenko A.V. Bank protection structures of water bodies, part 2. M.: RGAU-MCXA, 2020. 185 p.
3. Chernykh O.N., Burlachenko A.V. Features of changes in the profile of the slope of floodplain dams and the banks of water bodies under wave influence // Prirodoobustroystvo. 2023. No. 2. P. 81-85.
4. Chernykh O.N., Burlachenko A.V. Ways to solve the problems of the Imereti Bay // Bulletin of the educational and methodological association for education in the field of environmental management and water use. 2021. No. 23. P. 33-39.
5. Shulyak V.A. Some issues of interaction of a wave flow with a deformed bottom at low speeds. Proceedings of the Institute of Oceanology. V. 48, 1961.
6. Mass E.I. Study of non-erosive wave flow velocities for non-cohesive and cohesive soils. Abstract of the dissertation of candidate of technical sciences – Tbilisi, 1968. 25 p.
7. Mirtskhulava T.E. Erosion of riverbeds and methods for assessing their stability. – M.: Kolos, 1967.
8. R.A. Bagnold. The movement by waves, small scale experiments. I. Inst. Civil Eng. V. 27. No. 4. 1947.
9. Pyshkin E.A., Zeitz E.S., Sokolnikov Yu.N. Regulation of alongshore sediment flow. – Kyiv: Naukova Duma, 1972.
10. Chernykh O.N., Burlachenko A.V. Features of changes in the profile of the slope of floodplain dams and the banks of water bodies under wave influence // Prirodoobustroystvo. 2023. No. 2. P. 81-85.
11. Chernykh O.N., Burlachenko A.V. Assessment of the main parameters of wave impact on the gentle slopes of the banks of large water bodies [Journal] // Structural mechanics of engineering structures and structures. 2023. V. 19. No. 2. P. 000-000. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-1-110-116>.

12. **Алтунин Д.И., Алтунин В.И.** Переформирование откосов пойменных дамб // Гидравлика водопропускных сооружений: Тезисы докладов V Республиканской конференции по научно-техническим проблемам гидравлики дорожных водопропускных сооружений. Саратов: 1985. 205 с.

13. **Алтунин Д.И.** Кинематические характеристики волн на пологих прибрежных склонах // Водопропускные сооружения в условиях Крайнего Севера: Сборник научных трудов. Якутск: ЯГУ, 1986. 132 с.

14. **Altunin V.I., Chernyh O.N., Burlachenko A.V.** Hydraulic Resistance of Corrugated Metal Culvert Pipes with Elevated Abrasive Resistance // Power Technology and engineering. 2016. V. 50, Iss. 4. Pp. 385-390.

15. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82*. 2012.

16. Технические условия определения волновых воздействий на морские и речные сооружения и берега. СН-92-60. Стройиздат, 1960.

17. **Ranieri G.** The surf zone distortion of beach profiles in small-scale coastal models. J. of Hydr. Res. 2007. № 45 (2). Pp. 261-269.

Об авторах

Ольга Николаевна Черных, канд. техн. наук, доцент кафедры гидротехнических сооружений; Scopus AuthorID: 57213261727; ORCID:0000-0003-2905-446X; SPIN-код:7757-7969; AuthorID: 692667; chernih@rgau-msha.ru

Алёна Владимировна Бурлаченко, канд. техн. наук, доцент; WoS ResearcherID: HPE-1499-2023; Scopus AuthorID: 57191856023; ORCID:0000-0003-2617-9515, SPIN-код: 3155-2490; AuthorID: 1098780; chtara@mail.ru

Ярослав Юрьевич Бурлаченко, соискатель; yaroslav.burlachenko@sneak-mail.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Черных О.Н., Бурлаченко А.В., Бурлаченко Я.Ю. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Criteria of authorship

The authors declare no conflict of interest / Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Вклад авторов

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 17.12.2023

Поступила после рецензирования / Received after peer review 14.02.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 14.02.2024

12. **Altunin D.I., Altunin V.I.** Reshaping the slopes of floodplain dams // Hydraulics of culverts. Abstracts of reports of the V Republican Conference on scientific and technical problems of hydraulics of road culverts. Saratov; 1985. 205 p.

13. **Altunin D.I.** Kinematic characteristics of waves on gentle coastal slopes // Culvert structures in the Far North. Collection of scientific papers. Yakutsk, ed. YSU, 1986. 132 p.

14. **Altunin V.I., Chernyh O.N., Burlachenko A.V.** Hydraulic Resistance of Corrugated Metal Culvert Pipes with Elevated Abrasive Resistance // Power Technology and engineering. 2016. V. 50, Issue 4, R. 385-390.

15. SP 38.13330.2012. "Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and from ships)" (updated edition of SNiP 2.06.04-82*). 2012.

16. Technical conditions for determining wave impacts on sea and river structures and banks. SN-92-60. Stroyizdat, 1960.

17. **Ranieri G.** The surf zone distortion of beach profiles in small-scale coastal models. J. of Hydr. Res., 2007,45(2), 261-269.

Author information

Olga N. Chernykh, DSc (Eng), professor of the department hydro technical structures; Scopus AuthorID: 57213261727; ORCID:0000-0003-2905-446X; SPIN-код:7757-7969; AuthorID: 692667; chernih@rgau-msha.ru

Alyona V. Burlachenko, CSc (Eng), associate professor; WoS ResearcherID: HPE-1499-2023; Scopus AuthorID: 57191856023; ORCID:0000-0003-2617-9515, SPIN-код: 3155-2490; AuthorID: 1098780; chtara@mail.ru

Yaroslav Yu. Burlachenko, applicant; yaroslav.burlachenko@sneak-mail.ru

Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Burlachenko Ya.Y., carried out practical and theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. They have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.