

Выводы

С увеличением глубины воды в нижнем бьефе абсолютное значение глубины размыва уменьшается для всех типов гасителей и струенаправляющих стенок, а расстояние до центра воронки размыва уменьшается.

При больших подтоплениях действие гасителей энергии с выбранными геометрическими параметрами и струенаправляющих стенок, изученных ранее, практически одинаковое. Так, значение H_p для $S = 20\%$ при $h_{нб} = 3,6$ м колеблется от 3,92 до 3,84 для гасителей; для струенаправляющих стенок – 3,87 (то же для $S = 100\%$: при $h_{нб} = 3,6$ м – от 4,14 до 4,06 для гасителей; для струенаправляющих стенок – 4,2). Значения H_p для $S = 20\%$ при $h_{нб} = 6,3$ м составляют 6,44 как для гасителей, так и для струенаправляющих стенок (то же для $S = 100\%$: $h_{нб} = 6,3$ м; $H_p = 6,6$ м для всех рассмотренных устройств нижнего бьефа).

Предлагаемые зависимости позволяют проектировать более надежные конструкции в нижнем бьефе водопропускных сооружений, оборудованных конусными затворами.

1. Кавешников А. Т., Сивак М. Ю. Влияние различных типов гасителей на вторую сопряженную глубину при работе одним конусным затвором // Роль природообустройства в обеспечении устойчивости функционирования и развития экосистем: материалы Международной научно-практической конференции. – М.: МГУП, 2006. – Ч. 1. – С. 412–417.

2. Кавешников А. Т., Сивак М. Ю. Гашение энергии потока в нижнем бьефе водопропускных сооружений с конусными затворами // Гидротехническое строительство. – 2006. – №9. – С. 23–26.

3. Сивак М. Ю. Влияние гасителей энергии на сопряжение бьефов за водопропускными сооружениями с конусными затворами: дис. ... канд. техн. наук: 220.045.02. – М.: МГУП, 2007. – 169 с.

Материал поступил в редакцию 18.04.13.

*Сивак Мария Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, зав. аспирантурой
Тел. 8 (499) 153-84-60*

В порядке обсуждения

УДК 502/504:532.5

А. Х. КАТЛИНЕ КОБЛЕВ, К. Н. МАКАРОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Сочинский государственный университет

НАКАТ ВОЛН НА БЕРЕГА И СООРУЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕЛЬЕФА ПОДВОДНОГО БЕРЕГОВОГО СКЛОНА

Рассматривается накат волн на берега и берегозащитные сооружения в зонах подводных каньонов на примере побережья Имеретинской низменности в Адлерском районе города Сочи. Установлено, что накат волн на берег в зонах каньонов в 2 раза и более превышает накат на соседних участках, что не следует из нормативной методики. Предложена математическая модель наката волн на берега, учитывающая различия в уклонах подводной и надводной частей берегового склона, позволяющая получить параметры наката в зонах подводных каньонов, соответствующие данным наблюдений.

Накат волн на берег, обрушение волн, отражение волн, подводные каньоны, калибровка модели.

There is considered a wave setup on coasts and coast-protecting structures in the zones of underwater canyons by the example of the Imeretinskaya lowland coast in the Adler region of Sochi. It is established that wave setup on the coast in the zones of canyons exceeds the wave setup in the adjacent areas by twice or more which does not correspond to the normative method. There is proposed a mathematical model of wave setup which takes into consideration the differences in inclinations of underwater and above-water parts of the coast slope, allowing obtaining the wave setup parameters in the zones of underwater canyons corresponding to the observation data.

Wave setup, waves breaking, waves reflection, underwater canyons, model calibration.

Нормативные документы рекомендуют рассчитывать высоту наката волн на береговые откосы и пляжи в предположе-

нии, что уклоны надводной и подводной их частей одинаковы [1, 2]. В ранее издававшихся нормативных документах по проек-

тированию морских берегозащитных сооружений при различных уклонах надводной и подводной частей берегового склона рекомендовалось рассчитывать коэффициент приведения к однообразному уклону [3].

Согласно [1], расчет наката волн на откосы следует выполнять по формуле

$$h_{\text{run}} = k_r k_p k_{\text{sp}} k_{\text{run}} k_a h_{1\%}, \quad (1)$$

где $h_{1\%}$ – высота волны 1%-й обеспеченности в системе перед откосом; k_r, k_p – коэффициенты шероховатости и проницаемости откоса, принимаемые по таблице; k_{sp} – коэффициент, зависящий от скорости ветра (дополнительная накачка энергии) и принимаемый по таблице; k_i – коэффициент обеспеченности по накату; k_a – коэффициент, принимаемый в зависимости от угла подхода волн к берегу; k_{run} – эмпирический коэффициент, зависящий от пологости волны и уклона откоса (меняется от 0,15 для крутых волн и очень пологого откоса до 2,7 – для пологих волн при заложении откоса 1:2; этот коэффициент учитывает и отражение волн от откоса, что увеличивает высоту наката).

В [1] для определения k_{run} приведен график, а в документе [2] его рекомендуется определять по следующим формулам:

$$k_{\text{run}} = \frac{1,2}{\text{ctg } \varphi} \sqrt{\frac{\lambda_d}{h_{d1\%}}} \quad \text{при } \text{ctg } \varphi > 1,5;$$

$$k_{\text{run}} \leq k_{\text{run.p}} = 2,7; \quad (2)$$

$$k_{\text{run}} = \text{ctg } \varphi + 1,2 \quad \text{при } 1 \leq \text{ctg } \varphi \leq 1,5,$$

где φ – угол наклона откоса к горизонту; λ_d – средняя длина волны на глубокой воде; $h_{d1\%}$ – высота волны 1%-й обеспеченности в системе на глубокой воде.

На пляжи и сооружения, находящиеся на них, накатываются и волны перемещения, образовавшиеся из колебательных волн в результате скачкообразного перехода при последнем обрушении. При этом зоной наката следует считать зону от последнего обрушения волны и ее перехода из волны колебательной в волну перемещения до границы ее наката на сухой берег.

В документе [4] особо отмечена роль отражения волн в расчетах высоты наката волн на откосы и пляжи:

полное отсутствие отражения – при $r \leq 0,1$, когда происходит полное разрушение волны на откосе;

незначительное отражение – при $0,1 < r < 0,5$, когда разрушение преобладает над отражением;

значительное отражение волн – при $0,5 \leq r < 1$, когда отражение преобладает над разрушением;

полное отражение волн при $r = 1$, где $r = h_{\text{отр}}/h_{\text{исх}}$ – коэффициент отражения волн от откоса; $h_{\text{отр}}, h_{\text{исх}}$ – высота отраженной и исходной волн соответственно.

Коэффициент отражения волны откоса рекомендуется определять по формулам [4]:

для откосов круче 1 : 3,7 –

$$r = \frac{1}{h_{\text{исх}}} \sqrt{\frac{2\varphi}{\pi}} \frac{\lambda}{\pi(1+m^2)}; \quad (3)$$

для откосов 1 : 3,7 и более пологих –

$$r = \frac{1}{h_{\text{исх}}} \frac{\lambda}{4m^{5/2}}. \quad (4)$$

Рассмотрим далее накат волн на берег в зоне подводного каньона, схематично показанного на рис. 1.

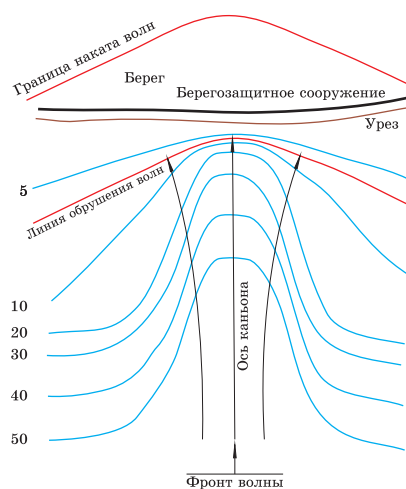


Рис. 1. Схема подводного каньона

В случае распространения волнения с волновыми лучами, параллельными оси каньона, центральный луч пройдет вдоль оси каньона, и волна разрушится в непосредственной близости от берега. Таким образом, участок сооружения, расположенный против вершины каньона, окажется практически в начале зоны наката волн, т. е. гораздо ближе к линии обрушения, чем соседние участки.

Согласно [1, 5], волновые нагрузки на сооружения максимальны на линии обрушения волн и линейно убывают по мере удаления сооружения от нее. Следовательно, волновые нагрузки на участок сооружения, расположенный против вершины каньона, будут значительно выше, чем на соседних участках.

Это обстоятельство никак не учитывается в нормативных документах, что приводит к разрушениям береговых сооружений, располагающихся против подводных каньонов, поскольку их усиления по сравнению с соседними участками берегов обычно не предусматривается.

По мнению авторов, именно это произошло при проектировании и строительстве берегозащитного сооружения на побережье Имеретинской низменности в Адлерском районе города Сочи. Здесь два участка сооружения располагаются против подводных

каньонов Новый и Константиновский. На этих участках наблюдается мощное воздействие накатных волн на сооружение вплоть до его разрушения (рис. 2).



Рис. 2. Накат волн на берег и берегозащитное сооружение в зоне каньона Нового в шторме (24 марта 2013 года)

Всю зону наката обрушающихся волн можно разделить на подводную часть шириной $L_{н.под.} = d_{cr}/i_{под}$ (d_{cr} – глубина последнего обрушения волны, $i_{под}$ – уклон подводной части берегового склона) и надводную шириной $L_{н.над} = h_{н}/i_{над}$ ($h_{н}$ – высота наката волны на берег, $i_{над}$ – уклон надводной части пляжа).

Определение высоты и длины наката обрушающихся волн на берег может быть выполнено на основе закона сохранения энергии прибойных волн.

Кинетическая энергия единицы массы воды в гребне разрушающейся волны определяется так:

$$E_k = \rho v^2 / 2, \tag{5}$$

где ρ – плотность воды; v – скорость частицы в гребне волны ($v = (g(d_{cr} + h_{cr}))^{0.5}$); g – гравитационное ускорение; d_{cr} – глубина обрушения; h_{cr} – высота волны при обрушении.

Полагая для последнего обрушения $d_{cr} \approx h_{cr}$, получим $v = (2gh_{cr})^{0.5}$. Тогда $E_k = \rho gh_{cr}$.

Достигая максимальной точки наката, частица, израсходовав всю кинетическую энергию на преодоление сил турбулентной вязкости, тяжести и трения, поднимется на высоту наката $h_{н}$ над расчетным уровнем моря. При этом частица будет обладать потенциальной энергией $E_{п} = \rho gh_{н}$.

Проходя приурезовую зону между линией обрушения и урезом воды (подводная часть берегового склона), частица расходует часть энергии:

$$E_{турб} = \rho g k_{турб} h_{cr} / i_{под}, \tag{6}$$

где $k_{турб}$ – линейаризованный (безразмерный) коэффициент турбулентной вязкости (Battjes, 1975) ($k_{турб} = K_{эк} ((5/16)i_{под})^{1/3} (gd_{cr})^{0.5} T / \lambda_{cr}$, где $K_{эк}$ – эмпирический калибровочный коэффициент, подлежащий определению по данным физического моделирования или натуральных наблюдений; $i_{под}$ – уклон подводной части берегового склона; T – период расчетной волны; λ_{cr} – длина волны на линии обрушения).

При подъеме на высоту $h_{н}$ по надводной части берегового откоса с уклоном $i_{над}$ на преодоление силы трения и проницаемость откоса частица затратит энергию, равную

$$E_{трн} = \rho gh_{н} (1 - k_r)(1 - k_p) / i_{над}, \tag{7}$$

где k_r, k_p – коэффициенты шероховатости и проницаемости надводного откоса пляжа, аналогичные коэффициентам в формуле (1) и определяемые по специальной таблице из [1].

Приравняв кинетическую и потенциальную энергии и учитывая потери на турбулизацию потока, трение о поверхность берегового склона, проницаемость откоса и отражение волн от него, получим:

$$\rho gh_{cr} = \rho gh_{н} + \rho g k_{турб} h_{cr} / i_{под} + \rho g (1 - k_r)(1 - k_p) h_{н} / i_{над}, \tag{8}$$

откуда

$$h_{н} = (1+r)h_{cr} (1 - (k_{турб}/i_{под})) / (1 + ((1 - k_r)(1 - k_p) / i_{над})), \tag{9}$$

где r – коэффициент отражения, определяемый по формулам (3), (4).

Длина наката волны на надводную часть пляжа

$$L_{н} = h_{н} / i_{над}. \tag{10}$$

В выражение (9) дополнительно могут быть введены коэффициенты, учитывающие скорость ветра и угол подхода волн в соответствии с [1].

Поскольку нормативная методика расчета наката волн на откосы получена по данным массовых экспериментов [6], результаты расчетов по предлагаемой методике и методике из нормативных документов при постоянных уклонах подводной и надводной частей берегового склона должны совпадать. Это обстоятельство дает возможность провести предварительную калибровку предлагаемой модели и получить выражение для определения величины коэффициента $K_{эк}$.

По результатам массовых расчетов получена следующая зависимость для калибровочного коэффициента $K_{эк}$:

$$\begin{aligned} \text{при } i_{под} < 0,12 \quad K_{эк} &= 0,136 + i_{под}; \\ \text{при } i_{под} \geq 0,12 \quad K_{эк} &= 0,24 - (i_{под} - 0,12). \end{aligned} \tag{11}$$

Сопоставление результатов расчетов высоты наката волн на прямолинейный откос по нормативной методике и по предложенной модели после ее калибровки приведено на рис. 3.

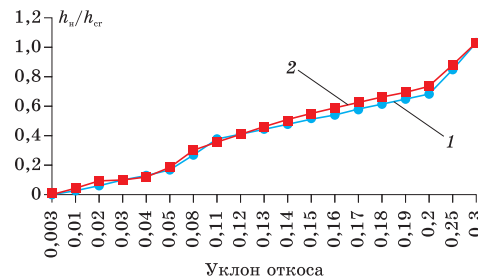


Рис. 3. Относительная высота наката ($h_{н}/h_{cr}$) волн на прямолинейный откос в зависимости от его уклона: 1 – рассчитанная по нормативному документу [1]; 2 – рассчитанная по предлагаемой модели после ее калибровки

Рисунок 3 демонстрирует хорошее совпадение результатов расчетов по предлагаемой модели с результатами, полученными по нормативному документу [1], при условии постоянного уклона берегового откоса вплоть до коэффициента заложения откоса 1:3.

Далее были выполнены расчеты по предложенной модели высоты наката волн различной высоты при постоянном уклоне надводной части откоса с варьированием уклона подводной его части. Результаты приведены на рис. 4.

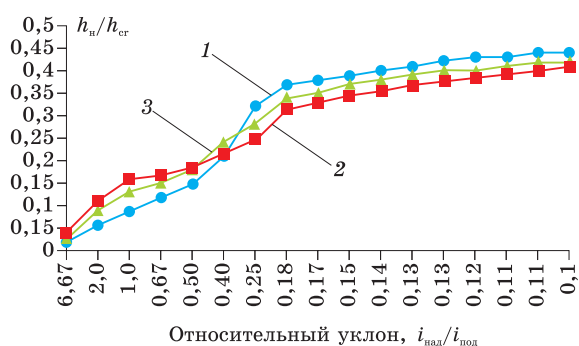


Рис. 4. Относительная высота наката ($h_n/h_{кр}$) волн на откос в зависимости от относительного его уклона, рассчитанная по предлагаемой модели: 1 – $h = 3,5$ м; 2 – $h = 5$ м; 3 – $h = 6$ м

Из рисунка 4 следует, что с увеличением уклона подводной части берегового склона высота наката волн вначале резко увеличивается, затем переходит в режим более плавный.

Для участка берегоукрепления в Имеретинской низменности, показанного на рис. 2, расположенного против каньона Нового, уклон подводной части берегового склона составляет $i_{под} = 0,2$, на соседних участках, вне зоны каньона, $i_{под} = 0,04$. Уклон надводной части берегового склона на обоих участках составляет $i_{над} = 0,05$. Расчетная высота волны 1%-й обеспеченности по линии последнего обрушения в шторме повторяемостью 1 раз за 25 лет составляет $h_{кр} = 5,7$ м, средняя длина $\lambda_{кр} = 102$ м.

Расчет высоты и длины наката волн по предложенной модели при указанных параметрах волн и берегового склона дает следующие результаты:

- в зоне каньона Нового $h_n = 3,5$ м, $L_n = 70$ м;
 - вне зоны каньона $h_n = 1,6$ м, $L_n = 33$ м.
- С учетом таких результатов накат

волны на берег в зоне каньона более чем в 2 раза превышает накат на соседних участках. Однако берегоукрепление имеет одинаковые конструктивные параметры. По-видимому, это явилось одной из причин разрушения берегозащитного сооружения на участке подводного каньона Нового.

Выводы

Разработана математическая модель для расчета наката волн на берега с учетом различных уклонов подводного и надводного участков берегового склона, позволяющая более надежно рассчитывать параметры наката волн на берега и сооружения, расположенные в зонах подводных каньонов.

1. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов): СП 38.13330.2012. – М.: Минрегионразвития РФ, 2012. – 112 с.

2. Указания по расчету нагрузок и воздействий от волн, судов и льда на морские гидротехнические сооружения: Р 31.3.07–01. – М.: СоюзморНИИпроект, 2001. – 75 с.

3. Технические указания по проектированию морских берегозащитных сооружений: ВСН183–74. – М.: Минтрансстрой, 1975. – 77 с.

4. Технические условия определения волновых воздействий на морские и речные сооружения и берега: СН 92–60. – М.: Госстрой СССР, 1960. – 64 с.

5. Проектирование морских берегозащитных сооружений: СП 32–103–97. – М.: Трансстрой, 1998. – 221 с.

6. Лапко Д. Д., Стрекалов С. С., Завьялов В. К. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. Теория. Инженерные методы. Расчеты. – Л.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1990. – 432 с.

Материал поступил в редакцию 18.04.13.

Катлине Коблев Анзор Хулио, аспирант
Тел. 8-918-109-42-15

E-mail: anzor-the-black@yandex.ru

Макаров Константин Николаевич, доктор технических наук, зав. кафедры «Городское строительство»

Тел. 8-922-235-82-62

E-mail: ktk99@mail.ru