

К.Н.Макаров, А.Х.Катлине Коблев

Сочинский государственный университет, г.Сочи

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОЛН НА БЕРЕГОЗАЩИТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ В ЗОНАХ ПОДВОДНЫХ КАНЬОНОВ

Рассматривается накат волн на берега и берегозащитные сооружения в зонах подводных каньонов на примере побережья Имеретинской низменности в Адлерском районе г.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.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *накат волн на берег, обрушение волн, отражение волн, подводные каньоны, калибровка модели.*

В [1] отмечено, что взаимодействие волн с откосами гидротехнических сооружений и берегами сопровождаются периодическим обрушением волн, подъемами и скатыванием масс воды по откосу. Эти явления следует рассматривать, как сложные энергетические процессы, трудно поддающиеся теоретическому анализу.

Этой проблемой занимались такие ученые, как И.И.Диденкулова, Г.Ф.Красножон, Д.Д.Лаппо, П.А.Мадсен, Е.Н.Пелиновский, В.В.Хомицкий, В.С.Шайтан [1 – 6] и другие.

Расчетные зависимости метода определения наката волн на прямолинейные откосы, укрепленные плитами, разработанные Г.Ф.Красножоном, легли в основу Российского нормативного метода [7].

Согласно [7], расчет наката волн на откосы рекомендуется выполнять по формуле:

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

где $h_{1\%}$ – высота волны 1 % 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, он 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, в том числе, отражение волн от откоса, что увеличивает высоту наката.

Нормативный документ рекомендует рассчитывать высоту наката волн на береговые откосы и пляжи в предположении, что уклоны надводной и подводной их частей одинаковы.

На реальные пляжи и сооружения накатываются фактически волны

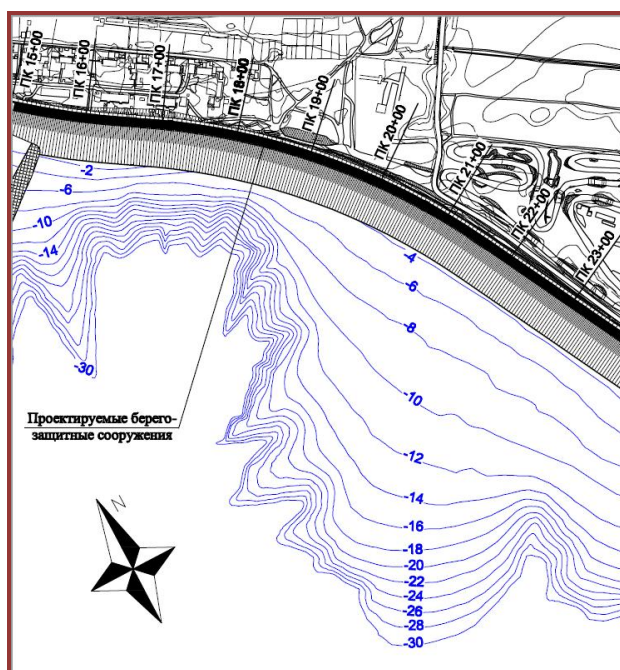


Рис. 1. Берегозащита в зоне подводного каньона Нового в Имеретинской низменности.

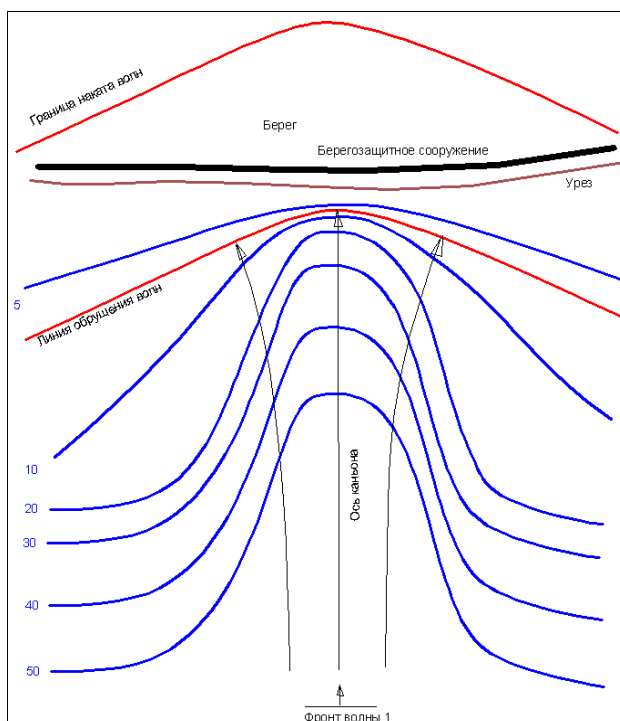


Рис. 2. Распространение волн над подводным каньоном при фронтальном подходе волн к его оси.

перемещения, образовавшиеся из колебательных волн в результате скачкообразного перехода при последнем обрушении. Причем 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 ряде случаев наблюдалось разрушение сооружений, расположенных в прибойной или приурезовой зонах против подводных каньонов. Это же явление имеет место при воздействии волн на берегозащитное сооружение на побережье Имеретинской низменности в Адлерском районе г.Сочи, расположенное против каньона Нового (рис.1). Построенное в полном соответствии с проектом, сооружение постоянно деформируется именно на участке, расположенном против вершины этого подводного каньона.

Рассмотрим накат волн на берег в зоне подводного каньона, схематично показанного на рис.2.

В случае распространения волнения с волновыми лучами, параллельными оси каньона (фронт волны 1 на рис.2), центральный луч

пройдет вдоль оси каньона, и волна, пусть даже несколько ослабленная в результате расхождения волновых лучей, разрушится в непосредственной близости от берега. Ширина подводной части зоны наката волн, расположенная между линией разрушения волн и урезом воды, будет узкой, такой, что потери волновой энергии на ней будут минимальны. Таким образом, участок сооружения, расположенный против вершины каньона, окажется практически в начале зоны наката волн, то есть гораздо ближе к линии обрушения, чем соседние участки.

Согласно [1], 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.

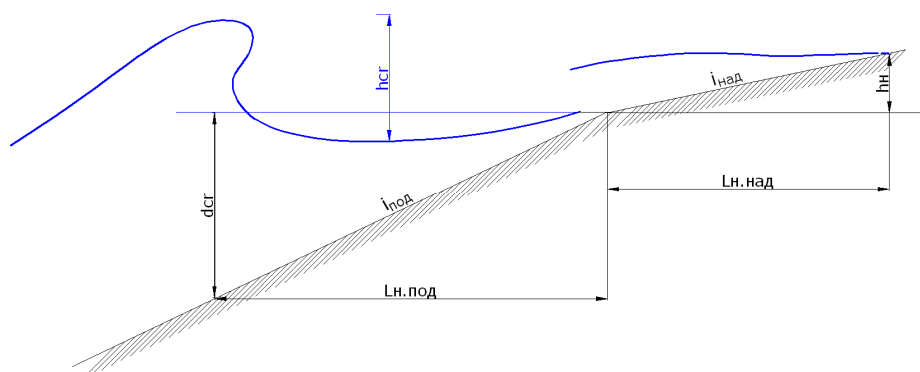
Это обстоятельство никак не учитывается в нормативных документах, когда накат волн на берег рассчитывается в предположении постоянного уклона дна. Указанное обстоятельство и приводит, по видимому, к разрушениям береговых сооружений, располагающихся против подводных каньонов, поскольку их усиления, по сравнению с соседними участками берегов, обычно не предусматривается.

Как следует из рис.2, приурезовая зона в вершинах каньонов отличается от прилегающей тем, что уклоны надводного и подводного участков берегового склона существенно отличаются. А именно – подводная часть значительно круче надводной.

Из изложенного вытекает необходимость разработки методики расчета наката волн на берег, учитывающей особенности рельефа прибрежной зоны при наличии подводных каньонов, в частности – различные уклоны надводного и подводного участков берегового склона.

Авторами разработана математическая модель наката волн на берег, учитывающая различия в уклонах подводной и надводной частей берегового склона [8]. Теоретические основы модели заключаются в следующем.

Всю зону наката обрушающихся волн на берег можно разделить на подводную часть шириной $L_{н.под} = d_{сг}/i_{под}$, где $d_{сг}$ – глубина последнего обрушения волны, $i_{под}$ – уклон подводной части берегового склона (рис.3) и надводную шириной $L_{н.над} = h_{н}/i_{над}$, где $h_{н}$ – высота наката волны на берег, $i_{над}$ – уклон надводной части пляжа.



Р и с . 3 . Схема к расчету наката волны на берег.

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 следующим образом:

$$E_k = \rho V^2 / 2, \quad (2)$$

где ρ – плотность воды, V – скорость частицы в гребне волны, равная $V = (g(d_{cr} + h_{cr}))^{0.5}$, 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 $E_k = \rho gh_{cr}$.

При достижении частицей максимальной точки наката, она, израсходовав всю кинетическую энергию на преодоление сил турбулентной вязкости, тяжести и трения, поднимется на высоту наката h_n над расчетным уровнем моря. При этом частица будет обладать потенциальной энергией $E_n = \rho gh_n$.

Проходя приурезовую зону между линией обрушения и урезом воды (подводная часть берегового склона), частица потеряет на турбулизацию потока часть энергии

$$E_{турб} = \rho g k_{турб} h_{cr} / i_{под}, \quad (3)$$

где $k_{турб}$ – линеаризованный (безразмерный) коэффициент турбулентной вязкости (Battjes, 1975),

$$k_{турб} = K_{эк} ((5/16) i_{под})^{1/3} (g d_{cr})^{0.5} T / \lambda_{cr},$$

T – период расчетной волны, λ_{cr} – длина волны на линии обрушения, $i_{под}$ – уклон подводной части берегового склона, $K_{эк}$ – эмпирический калибровочный коэффициент, подлежащий определению по данным физического моделирования или натуральных наблюдений.

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

$$E_{трн} = \rho g h_n (1 - k_r)(1 - k_p) / i_{над}, \quad (4)$$

где k_r , k_p – коэффициенты шероховатости и проницаемости надводного откоса пляжа, определяемые по табл.Д1 из [7].

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

$$\rho g h_{cr} = \rho g h_n + \rho g k_{турб} h_{cr} / i_{под} + \rho g (1 - k_r)(1 - k_p) h_n / i_{над}, \quad (5)$$

откуда

$$h_n = (1 + r) h_{cr} (1 - (k_{турб} / i_{под})) / (1 + ((1 - k_r)(1 - k_p) / i_{над})), \quad (6)$$

где r – коэффициент отражения.

Длина наката волны на надводную часть пляжа определяется по формуле:

$$L_{н.над} = h_n / i_{над}. \quad (7)$$

Разумеется, в выражение (6) могут быть дополнительно введены коэффициенты, учитывающие скорость ветра и угол подхода волн в соответствии с [2].

Поскольку нормативная методика расчета наката волн на откосы полу-

чена по данным массовых экспериментов [1], 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 $K_{эк}$:

$$\begin{aligned} \text{при } i_{\text{под}} < 0,12 & \quad K_{эк} = 0,136 + i_{\text{под}}; \\ \text{при } i_{\text{под}} \geq 0,12 & \quad K_{эк} = 0,360 - i_{\text{под}}. \end{aligned} \quad (8)$$

После калибровки имеет место совпадение результатов расчетов по предлагаемой модели с результатами, полученными по нормативному документу при условии постоянного уклона берегового откоса с расхождением не более 10 % вплоть до коэффициента заложения откоса 1 : 3.

Была выполнена проверка предложенной модели наката волн на берег по данным гидравлического моделирования взаимодействия волн с берегозащитным сооружением, построенным в Имеретинской низменности в Адлерском районе г.Сочи к востоку от порта Имеретинского (рис.4). Моделирование выполнялось в Научно-исследовательском центре «Морские берега», г.Сочи (филиал ОАО ЦНИИС), в волновом бассейне в масштабе 1 : 50.

Результаты экспериментов на пространственной гидравлической модели полностью подтверждают выдвинутые теоретические положения о характере наката волн на берега и сооружения в зонах подводных каньонов. А именно – линия обрушения волн приближается к урезу, а граница наката волн, соответственно, выдвигается на берег. Участки сооружения, расположенные в зонах подводных каньонов, подвергаются существенно большему волновому воздействию, нежели соседние участки. Это приводит к деформациям и разрушениям участков сооружений, расположенных в зонах каньонов, поскольку никаких дополнительных усилений этих участков, как правило, не предполагается.



Р и с . 4 . Накат волн на пляж и сооружение в районе каньона Нового в опыте на гидравлической модели в волновом бассейне.

Т а б л и ц а . Параметры наката волн в зоне каньона Нового, полученные в экспериментах, рассчитанные по нормативной методике согласно [7] и по предлагаемой модели.

направление шторма	h , м	T , с	λ , м	$I_{\text{нак.эк.}}$, м	$L_{\text{нак.эк.}}$, м	$I_{\text{нак.СП.}}$, м	$L_{\text{нак.СП.}}$, м	$I_{\text{нак.Мод.}}$, м	$L_{\text{нак.Мод.}}$, м
западное – юго-западное	11,0	16,1	153	> 4,9	> 70	3,8	54,8	5,0	71,3
юго-западное	10,6	8,6	94	4,8	68,6	3,2	45,5	4,8	69,0
южное	7,7	13,1	123	4,0	57,1	3,1	44,3	3,9	56,2

Можно утверждать, что это происходит по той причине, что нормативная методика расчета наката волн на берег не учитывает различия в уклонах подводного и надводного участков берегового склона и потому для участков с подводными каньонами дает заниженные результаты высоты и, соответственно, длины наката волн на берега и сооружения.

В табл. приведены значения параметров наката волн, принятых в качестве расчетных при проектировании берегозащитных мероприятий в зоне каньона Нового, полученные в экспериментах, рассчитанные по нормативной методике согласно [7] и по предлагаемой модели наката. Уклон надводной части берегового склона принят равным $i_{\text{над}} = 0,07$, уклон подводной его части $i_{\text{под}} = 0,17$ согласно натурному профилю берегового склона в вершине каньона Нового (рис.1).

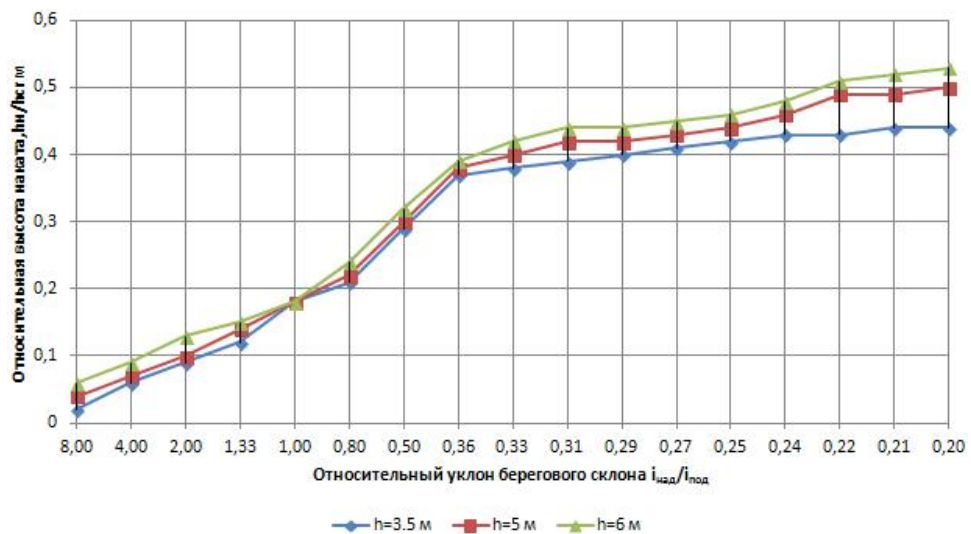
Как следует из таблицы, результаты расчета параметров наката волн на берег и сооружение в вершине каньона Нового по нормативному документу [7] являются существенно заниженными по сравнению с экспериментальными данными. Расчет по предлагаемой математической модели дает результаты, соответствующие данным экспериментов с расхождением не более 8 %. Это позволяет рекомендовать ее для применения в проектной практике.

Были выполнены расчеты по предложенной модели высоты наката волн различной высоты при постоянном уклоне надводной части откоса с варьированием уклона подводной его части. В этом расчете уклон надводной части пляжа принят равным 0,04, длина волны 60 м. Результаты приведены на рис.5 [8, 9].

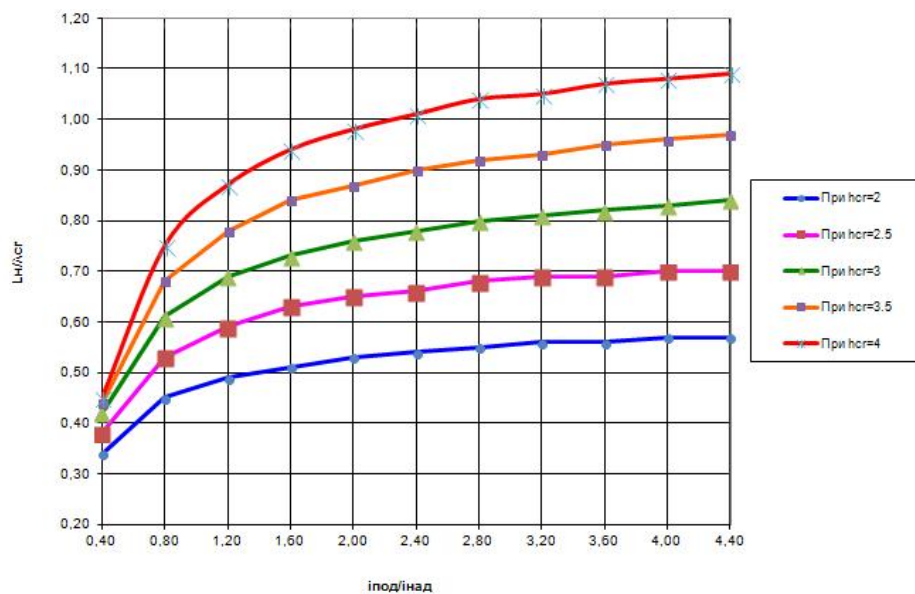
Из рис.5 следует, что с увеличением уклона подводной части берегового склона, высота наката волн вначале резко увеличивается, а затем это увеличение становится более плавным. Кроме того, имеет место зависимость относительной высоты наката от высоты волны (крутизна) – чем больше высота волны (крутизна), тем больше относительная высота наката.

На рис.6 приведены результаты расчета относительной длины наката от крутизны волны и уклона подводной части берегового склона при уклоне надводной его части, равной 0,04.

Из рис.6 следует, что с увеличением уклона подводной части берегового склона относительная длина наката вначале значительно возрастает, а с соотношения $i_{\text{под}}/i_{\text{над}} \approx 1,60$, этот рост становится более плавным.



Р и с . 5 . Относительная высота наката (h_n/h_{cr}) волн на откос в зависимости от относительного его уклона, рассчитанная по предлагаемой модели.



Р и с . 6 . Зависимость относительной длины наката от высоты волны и уклона подводной части берегового склона.

Таким образом, 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лапто Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К.* Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения.– Л.: ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева, 1990.– 432 с.
2. *Диденкулова И.И., Пелиновский Е.Н.* Накат длинных волн на берег: влияние формы подходящей волны // *Океанология.*–2008.– т.48, № 1.– С.5-10.
3. *Красножон Г.Ф., Сидорова А.Г.* Трансформация волн на мелководье / Управление поверхностными и подземными водными ресурсами и их использование.– М.: Изд-во АН СССР, 1961.– С.161-208.
4. *Madsen P.A., Fuhrman D.R.* Run-up of tsunamis and long waves in terms of surf-similarity // *Coastal Engineering.*– 2008.– v.55.– P.209-223.
5. *Никишов В.И., Селезов И.Т., Хомицкий В.В.* Взаимодействие уединенных поверхностных и внутренних волн с береговыми склонами // *Прикладна гідромеханіка.*– 2011.– т.13, № 2.– С.51-63.
6. *Шайтан В.С.* Проектирование креплений земляных откосов на водохранилищах.– М.: Стройиздат, 1986.– 216 с.
7. *СП 38.13330.2012.* Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов).– М.: Минрегионразвития РФ, 2012.– 111 с.
8. *Катлине Коблев А.Х., Макаров К.Н.* Накат волн на берега и сооружения на участках с подводными каньонами // *Гидротехническое строительство.*– 2013.– № 8.– С.39-42.
9. *Koblev A.Kh., Makarov K.N.* Run of waves onto shore and structures in sections with underwater canyons // *Power Technology and Engineering.*– 2014.– v.5.– P.348-351.

Материал поступил в редакцию 10.10.2015 г.
После доработки 26.10.2015 г.

K.N.Makarov, A.Kh.Catline Koblev

IMPACT OF WAVES ON COASTAL PROTECTION CONSTRUCTIONS IN AREAS OF SUBMARINE CANYONS

The waves run up on coasts and protection constructions in zones of underwater canyons on the example of the coast of the Imeretinskaya lowland in the Adler district of Sochi is considered. It is established that the run up of waves on the coast in zones of canyons twice and more exceeds a setup on the next sites that doesn't follow from a standard technique. The mathematical model of waves run up on the coast, considering distinctions in biases of underwater and surface parts of the coastal slope, allowing receiving setup parameters in zones of the underwater canyons, corresponding to data of supervision is offered.