

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 551.466.62

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ КАК ФАКТОРЫ ОБОСНОВАНИЯ РЕШЕНИЙ ПО ПОРТОВЫМ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИМ СООРУЖЕНИЯМ

© 2023 г. И. Г. Кантаржи^{1,*}, А. В. Куприн^{1,**}

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Ярославское шоссе, 26, Москва, 129337 Россия

*E-mail: kantardgi@yandex.ru

**E-mail: rtyter55@gmail.com

Поступила в редакцию 20.10.2022 г.

После доработки 11.11.2022 г.

Принята к публикации 28.11.2022 г.

По опубликованным данным из открытых источников проанализировано влияние морских волн и течений на портовые гидротехнические сооружения, рассмотрены характеристики размывов от волн, в том числе от волн цунами. Исследованы механизмы размыва от морских волн, связь между местным размывом и разжижением грунта. Исследовано их влияние на устойчивость морских гидротехнических сооружений. Проанализированы механизмы потери устойчивости гидротехническими сооружениями вследствие размыва волнами цунами. Приведен параметр усиления размыва от волн цунами, который представляет собой долю, на которую градиент порового давления уменьшает силы трения, сопротивляющиеся размыву. Такой подход позволяет учитывать явление разжижения грунта при оценке размывов, вызываемых волнами цунами.

Ключевые слова: волны цунами, местный размыв, разжижение грунта, морские гидротехнические сооружения, параметр усиления размыва

DOI: 10.31857/S0869780923010046, EDN: HSMQLA

ВВЕДЕНИЕ

На портовые гидротехнические сооружения действует большое количество разнообразных природных процессов, однако, морских инженеров интересуют в первую очередь два из них: морские волны и течения.

Морские волны и течения могут вызывать размыв дна у основания гидротехнических сооружений в период их эксплуатации. Размыв — это эрозия отложений вокруг основания сооружения, расположенного в проточной воде, например, в речной и прибрежной среде. Местный размыв дна, угрожающий общей устойчивости сооружений гравитационного типа, может возникать при действии штормовых волн и течений, струй от судовых движителей и волн цунами у гидротехнических сооружений (ГТС). Когда морское течение проходит вокруг оголовка волнолома, образуются водовороты, которые увеличивают скорость течения по его сторонам, вызывая эрозию отложений вниз по течению от его головы.

Один из самых малоизученных типов волн — сейсмические волны на воде или волны цунами. Цунами — одно из самых разрушительных природных явлений. Масштабы причиняемых ими бедствий и численность человеческих жертв не только страшны сами по себе, но подобные явле-

ния своей потенциальной опасностью создают постоянную тревогу у населения очень многих прибрежных регионов мира, особенно если в опасной зоне расположены другие угрожающие катастрофами объекты, как, например, АЭС. Сила самых разрушительных цунами настолько велика, что во многих авторитетных источниках информации утверждается невозможность эффективной защиты от них. Местные размывы от волн цунами угрожают целостности и устойчивости ГТС, запроектированных на цунамиопасных территориях, таких как Камчатский полуостров и Курильские острова. Проблема оценки параметров местного размыва не имеет строгого теоретического решения даже для простых случаев, и все известные работы базируются, в основном, на данных экспериментальных, главным образом лабораторных исследований и применении методов теории подобия и размерностей.

В связи с этим изучение механизма и установление параметров местных размывов у ГТС весьма актуально.

ВЛИЯНИЕ ВОЛН ЦУНАМИ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ ПОРТА

Цунами с высотой волны менее 2 м не приводит к серьезным бедствиям, но может нанести

ограниченный ущерб в прибрежной зоне. Однако, если высота волны превышает 4 м, она может причинить большой ущерб, включая разрушение сооружений и зданий. Если цунами превышает 8 м, оно становится разрушительным и может привести к гибели значительного количества людей [5]. Следует отметить, что воздействие цунами сильнее там, где больше высота волны, особенно в месте ее обрушения. Поэтому главные повреждения сооружений происходят именно в прибрежной зоне.

Основные повреждения порта могут быть разделены на следующие категории:

1. Ущерб, возникающий в результате обрыва швартовых, опрокидывания судов у причала.
2. Ущерб, возникающий в результате неконтролируемых движений маневрирующих или непришвартованных судов, переносимых потоками, вызванными цунами; повреждения при забрасывании судов из воды на причалы.
3. Частичное повреждение волнолома.
4. Размыв у дамб и волноломов.
5. Затопление и разрушение складов.
6. Унос потоком контейнеров и пиломатериалов.
7. Повреждение резервуаров и утечка масла, нефти и прочих химических веществ.
8. Разрушение жизненно важных коммуникаций.

Поведение цунами в порту зависит не только от ширины проранов между оградительными сооружениями, но и от площади акватории порта. Если акватория относительно небольшая, уровень воды в порту может быстро повыситься в результате вторжения цунами. С другой стороны, если порт имеет большую акваторию, при вторжении цунами повышение уровня моря будет меньше, что приведет к ограниченному затоплению.

Размывы, вызываемые волнами цунами

Причины разрушения сооружения, подверженного воздействию цунами, можно разделить на три группы: гидродинамические силы, огонь, распространяемый плавающими материалами; размыв и опрокидывание фундамента. Наличие сооружения приводит к изменениям схем течения в его окрестности, вызывая увеличение напряжения сдвига на морском дне и обеспечивая необходимую силу для увлечения частиц осадка с морского дна [10].

Хотя механизмы образования размыва под воздействием цунами кажутся схожими с механизмами размыва, вызванными штормовыми волнами, есть и некоторые различия. Штормовые волны имеют много циклов с периодом менее десятков секунд. Цунами, как правило, имеет один

или несколько циклов с периодом в минуты или десятки минут. Кроме того, типичное расстояние затопления цунами составляет несколько сотен метров, в некоторых случаях оно простирается более чем на километр, что намного больше, чем длина заплеска штормовой волны.

Также во время атаки цунами отличается процесс размыва. Цунами может длиться несколько минут или даже несколько часов. Продолжительность наката примерно равна продолжительности отката [6]. Между процессами наката и отката есть время, когда скорость практически равна нулю, обычно при максимальном затоплении. Другое различие между размывом цунами и размывом речным паводковым потоком заключается в скорости и числе Фруда¹. Волна при цунами протекает значительно быстрее, чем речной паводок. Разница в скорости и числе Фруда может создать различные схемы размыва и максимальную глубину ям размыва.

Выделяют четыре типа размывов от волн цунами.

Местный размыв — относительно глубокая яма размыва рядом с сооружением или под ним (рис. 1а). Термин “местный размыв” используется для обозначения потери материала в результате устойчивого сдвигового потока, направленного вокруг элемента сооружения [13]. Повышение порового давления может увеличить глубину локальных ям размыва.

Конкретнее под местным размывом понимается опускание слоя грунта в непосредственной близости от сооружения из-за локальных ускорений в придонной области и связанной с этим турбулентностью, приводящей к увеличению локальной способности переноса песка. Как только образовалась яма размыва, на ее краю будет происходить разделение потока, и будет развиваться слой смещения, увеличивая интенсивность турбулентности и стимулируя дальнейший размыв слоя (процесс самоусиления).

Размыв в результате перелива возникает в результате действия потока, который переливается через сооружение (волнолом или цунами-защитная дамба) и падает на грунт с сосредоточенным струйным воздействием (рис. 1б). Этот процесс похож на механизм перелива через водослив.

Размыв в результате сжатия потока возникает в месте, где широкий поток направляется в зону сжатия; такой размыв часто образуется рядом с преградой для потока.

Общий размыв — потеря грунта суши в зоне затопления, где высокая скорость потока и высокие

¹ Число Фруда или критерий Фруда, — один из безразмерных критериев подобия движения жидкостей и газов. Применяется в случаях, когда существенно воздействие внешних сил.

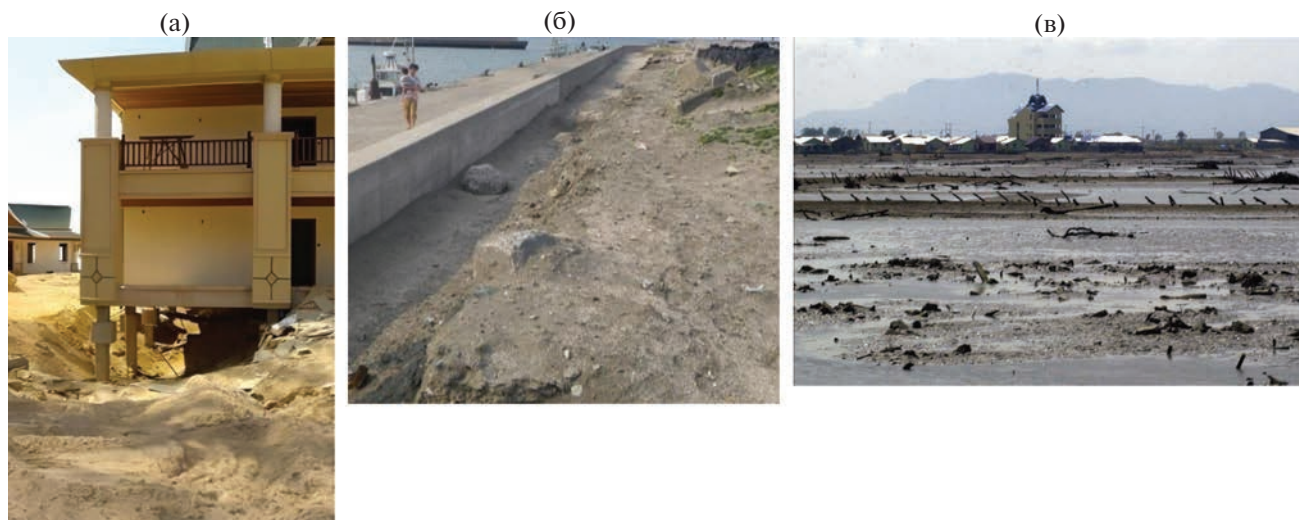


Рис. 1. Типы размывов от волн цунами: а — местный размыв (Ко Као Джомтьен, Пханган, Тайланд), б — размыв в результате перелива (порт Тайто, Япония), в — общий размыв.

напряжения сдвига при донном слое формируют широкие зоны эрозии (рис. 1в). Этот тип размыва может также усиливаться за счет повышения порового давления, что приводит к разжижению грунта [8].

Отсутствует достаточное количество данных измерений параметров общего размыва, необходимых для верификации методов расчета [2]. Как правило, общий размыв не повреждает сооружение, хотя он может способствовать разрушению его другими видами размыва в тех случаях, когда они накладываются друг на друга. Поэтому, в основном, существующие исследования фокусируются на анализе местных размывов.

Характеристики размыва и движения наносов количественно оцениваются путем наложения условий гипотетического, но типичного цунами. Модель цунами выбирается таким образом, чтобы параметры воздействия отражали реалистичные гидродинамические условия (например, скорость и глубина потока) типичного цунами [13]. К сожалению, лабораторные эксперименты не могут дать таких данных. Это связано с тем, что реальное цунами является очень протяженным (несколько сотен километров), распространяется на мелководье (на глубине нескольких километров от берега) с небольшой амплитудой (несколько метров). В результате возникает искажение в горизонтальной и вертикальной осях [5]. Следовательно, чтобы получить соответствующие данные, необходимо прибегать к численным или аналитическим моделям.

Анализ механизмов потери устойчивости гидротехническими сооружениями порта

Разрушение в результате размыва у основания с подветренной стороны — основной тип разру-

шения береговых дамб (рис. 2а). Отрыв защитного крепления обычно вызывается размывом основания. Бывали случаи, когда размыв основания не был обнаружен, но защитное крепление все равно выходило из строя. В некоторых случаях отрыв защитного крепления может быть обусловлен отрицательным давлением, вызванным быстрым переливом воды, который привел к всасыванию крепления и его удалению. Принято считать, что сдвиговые силы, вызванные быстрым течением у основания сооружения, создаваемым набегающими волнами, ответственны за размыв.

Отрыв верхнего крепления — один из наиболее распространенных типов разрушения прибрежных дамб. Основной причиной этого разрушения является отрицательное давление всасывания, вызванное быстрым потоком, переливающимся через сооружение [4]. Когда сила всасывания превышает силу сопротивления, удерживающего крепление на месте, защитное крепление отрывается, оставляя внутреннюю насыпь уязвимой для размыва. Как показано на рис. 2б, как только крепление прорвано, огромные гидродинамические силы часто приводят к полному разрушению сооружения.

Большинство парапетных стенок разрушаются в результате воздействия ударных сил волн. Как показано на рис. 2в, когда сила удара волн превышает прочность парапетной стенки, в сооружении появляются трещины, а в некоторых случаях она полностью разрушается. То же самое происходит и при опрокидывании таких сооружений, как дамбы и волноломы. Во многих случаях, когда сооружения разрушаются в результате опрокидывания, это происходит под действием ударной силы волн цунами, будь то при накате или при откате. Когда вызванный волнами опроки-

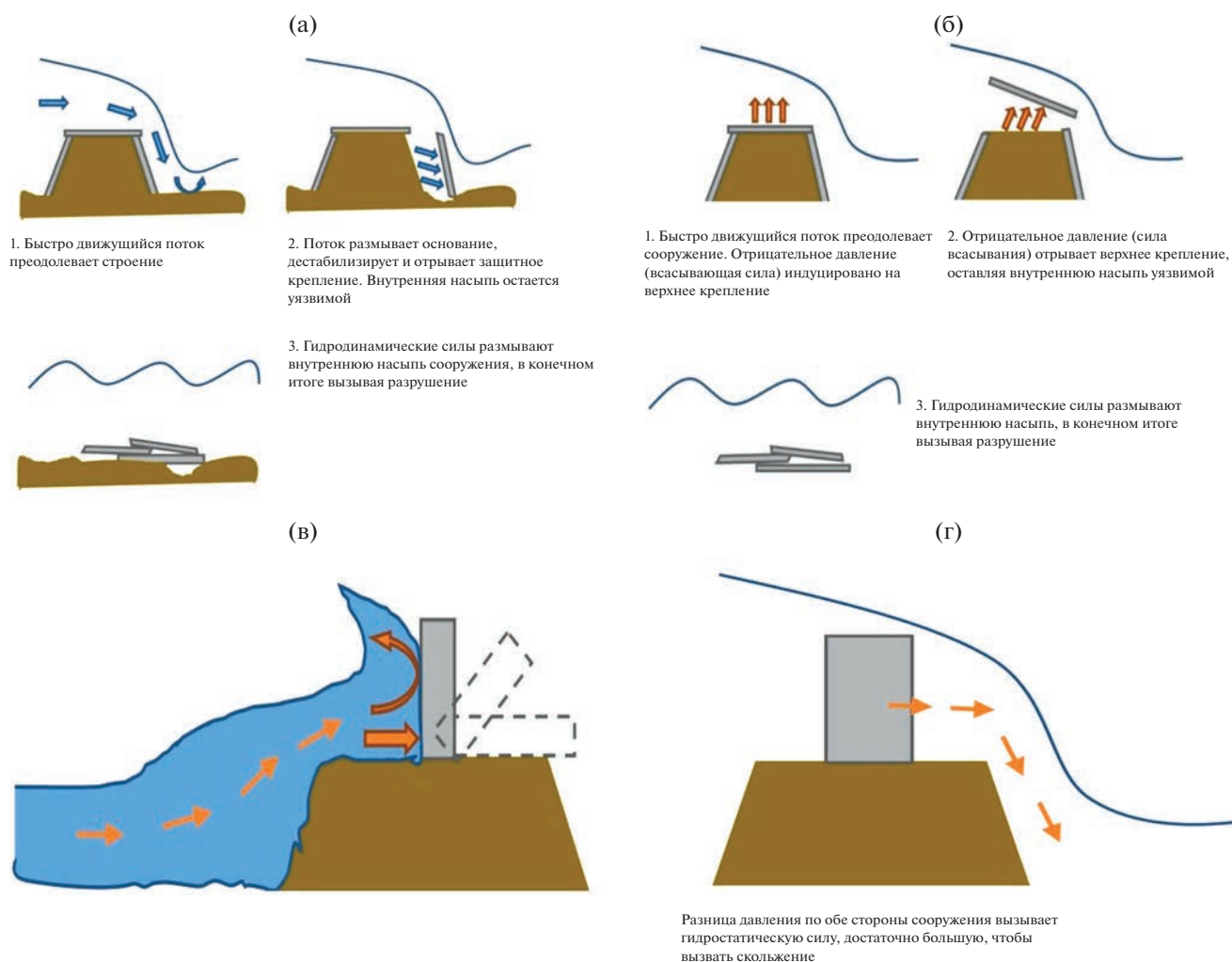


Рис. 2. Типы разрушения береговых дамб: а – размыв основания с подветренной стороны, б – отрыв верхнего крепления и разрушение, в – опрокидывание парапетной стенки, г – разрушение сооружения вследствие скольжения.

дывающий момент превышает восстанавливающий момент, сооружение опрокидывается [7]. Также гидростатические силы, обусловленные разницей уровней воды по обе стороны сооружения, часто приводят к разрушению при опрокидывании.

Скользящее разрушение – основной механизм разрушения волноломов. Когда волны цунами переливаются через сооружение, разница в уровне воды по обе стороны сооружения вызывает боковые гидростатические силы (рис. 2г). Эти силы толкают сооружение и во многих случаях приводят к его разрушению в результате скольжения.

Разжижение грунта

Усилению эффекта размыва может способствовать разжижение грунта. Разжижение грунта может произойти во время землетрясения, потому что при прохождении сейсмической волны ча-

стицы грунта начинают колебаться с разными скоростями, и часть контактов между ними разрывается, в результате чего грунт ведет себя не как твердое тело, а как плотная жидкость. Волновое разжижение морского дна создает риск для устойчивости морских сооружений.

Явление разжижения, вызванное морскими волнами, в последние годы привлекает все большее внимание при рассмотрении целостности прибрежных и морских сооружений. Разжижение грунта – процесс, вследствие которого грунт ведет себя не как твердое тело, а как плотная жидкость. Дифференциальная нагрузка на морское дно волной давления вызывает последовательность циклических сдвиговых напряжений в придонном слое грунта, и, если индуцированное напряжение сдвига превышает прочность грунта, может произойти значительная его деформация или разжижение, что окажет разрушительное

влияние на расположенные поблизости инженерные сооружения.

Условия цунами значительно осложняются переменной глубиной потока при затоплении, скоростью и продолжительностью генерируемых потоков, вызывающих высокие градиенты давления в грунте. Разжижение грунта морского дна сильно зависит от высоты и периода волн, причем глубина разжижения составляет примерно половину высоты волны.

Существуют две основные причины разжижения грунта: одна — это сдвигающая сила, создаваемая потоком на поверхности дна, а другая — это избыточное поровое давление в грунте, когда уровень воды падает [12]. С одной стороны, первая причина является важным фактором при анализе эрозии, вызванной крупномасштабными цунами с сильными течениями, и учитывается во многих исследованиях цунами. С другой стороны, существует незначительное количество исследований второй причины, посвященных феномену цунами, потому что размыв, вызванный цунами, чрезвычайно сильный, и при таких условиях оценить собственно его вклад в разжижение сложно.

Параметр усиления размыва от волн цунами

Как правило, существует два механизма разжижения: мгновенное разжижение и остаточное разжижение [11]. Мгновенное разжижение может происходить только в очень плотном песке. Его влияние на устойчивость морских сооружений незначительно. Однако мгновенное разжижение может усилить размыв донных отложений вокруг сооружений. Остаточное разжижение происходит из-за повышения порового давления в рыхлом грунте при циклическом нагружении. В большинстве случаев остаточное разжижение грунтов в основании сооружений оказывает критическое влияние на их устойчивость.

Грунт разжижается без эффективного напряжения между зернами грунта, если вертикальный градиент порового давления p превышает удельный вес грунта в сухом состоянии γ_b :

$$\left. \frac{\partial p}{\partial z} \right|_{z=z_0} > -\Lambda(\rho_{sat} - \rho) \times g = -\Lambda\gamma_b, \quad (1)$$

где ρ_{sat} — плотность грунта в водонасыщенном состоянии, ρ — плотность воды, Λ — параметр усиления размыва, введенный С. Тонкин (Tonkin) [9], z_0 — отметка подвижного слоя наносов.

Если наносы разжижаются, то силы сопротивления отсутствуют, и они легко размываются. Параметр усиления размыва, Λ , представляет собой долю, на которую градиент порового давления уменьшает силы трения, сопротивляющиеся размыву. Величина Λ эквивалентна коэффициенту

порового давления, т.е. отношению избыточного порового давления к начальному эффективному напряжению; $\Lambda = 1$ соответствует нулевому эффективному напряжению. Для любых заданных характеристик потока (скорость, глубина, турбулентность, другие) существует некоторое значение Λ , для которого остаточные силы трения достаточно малы, чтобы размыв происходил очень быстро [1]. Это пороговое значение Λ должно находиться в диапазоне от 0 до 1. Основываясь на лабораторных экспериментах по размыву грунта у вертикального цилиндра, было установлено, что значительная нестабильность грунта возникает, когда Λ превышает значение в 0.5 ($\Lambda \geq 0.5$).

Комбинирование аналитического решения с условием устойчивости грунта дает количественный прогноз глубины подвижного грунта d_s , вызванного цунами:

$$d_s = \frac{\Delta p}{\gamma_b \Lambda} \left(1 - 4i^2 \operatorname{erfc} \left[\frac{d_s}{2\sqrt{c_v \Delta T}} \right] \right), \quad (2)$$

где $i^2 \operatorname{erfc} [\cdot]$ — второй интеграл дополнительной функции ошибок. Глубина размыва d_s неявно входит в (2). Ограничивающее условие, когда $d_s \rightarrow 0$, дает меру того, может ли возникнуть какая-либо нестабильность грунта из-за градиента порового давления:

$$\Lambda(0) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\Delta p}{\gamma_b \sqrt{c_v \Delta T}} \quad (3)$$

Критическое значение $\Lambda \approx 0.5$, меньшее 1.0 (условие нулевого эффективного напряжения), связано с касательными напряжениями и турбулентностью, создаваемыми потоком и трехмерными эффектами (т.е. горизонтальными градиентами порового давления, возникающими вокруг цилиндра в экспериментах).

В экспериментах [3] было установлено, что во время обратного потока цунами уровень воды упал, что привело к разжижению в теле насыпи, и разжижение произошло на глубине 28% от максимальной глубины размыва вследствие сдвиговых сил. Явление разжижения может возникнуть из-за резкого падения уровня воды в области концентрации возвратного потока. Следовательно, необходимо учитывать явление разжижения при анализе устойчивости и размыва вокруг сооружений.

ВЫВОДЫ

Наибольший ущерб сооружениям при воздействии волн цунами наносит локальный размыв, на котором, в основном, фокусируются исследования соответствующих размывов. Определение характеристик размыва имеет большое значение для морской гидротехники при проектировании

гидротехнических сооружений на цунамиопасных территориях.

Основной механизм разрушения прибрежных дамб и стенок — размыв с подветренной стороны. Для волноломов основным механизмом разрушения является скользящее разрушение.

Усилению эффекта размыва может способствовать разжижение грунта. Основными причинами разжижения грунта являются: сдвигающая сила, создаваемая потоком на поверхности дна, и избыточное поровое давление в грунте, когда уровень воды падает.

Значительная нестабильность грунта возникает, когда параметр усиления размыва Λ превышает значение 0.5 ($\Lambda \geq 0.5$). Параметр Λ может использоваться для оценки областей, где мгновенное разжижение может быть ответственно за размыв и движение наносов, и для пересчета глубин размыва, полученных без учета разжижения.

Разжижение от волн цунами может проникать в слой грунта толщиной до 28% от максимальной глубины размыва. Явление разжижения может возникнуть из-за резкого падения уровня воды в зоне сосредоточения возвратного стока. Следовательно, явление разжижения необходимо учитывать при анализе размыва вокруг сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куприн А.В., Кантаржи И.Г. Влияние разжижения грунта на глубину размыва, вызываемого волнами цунами // Гидротехническое строительство. 2022. № 5. С. 8–12.
2. Куприн А.В., Кантаржи И.Г. Типы размывов от волн цунами, воздействующих на гидротехнические сооружения // Гидротехника, 2020. № 4 (61). С. 48–50.
3. Iida T., Kure S., Udo K., Mano A., Tanaka H. Scouring mechanism around structure by return flow of tsunami considering liquefaction // Journal of Japan Society of Civil Engineers, Series B2 (Coastal Engineering). 2015. V. 71 (2). P. 241–246. https://doi.org/10.2208/kaigan.71.I_241
4. Kato F., Suwa Y., Watanabe K., Hatogai S. Mechanisms of coastal dike failure induced by the reat East Japan Earthquake tsunami // Proc. 33rd Int. Conf. Coastal Engineering, 2012 Santander, Spain. <https://doi.org/10.9753/icce.v33.structures.40>
5. Kuprin A.V., Novakov A.D., Kantarzhi I.G., Gubina N.A. Local and General Scours Caused by Tsunami Waves // Power Technology and Engineering. 2021. V. 54. No 6. P. 836–840. <https://doi.org/10.1007/s10749-021-01296-1>
6. Kuswandi K., Triatmadja R., Istiarto I. Simulation of scouring around a vertical cylinder due to tsunami // Science of Tsunami Hazards. 2017. V. 36 (2). P. 59–69.
7. Lim G., Premaratne B., Jayaratne R., Marriott M., Shibayama T. Comparison of Failure Mechanisms of Coastal Structures due to the 2004 Indian Ocean and 2011 Tohoku Tsunami Events // Proc. 6th Int. Conf. on Structural Engineering and Construction Management, 2015.
8. Tonkin S., Francis M., Bricker J. Limits on Coastal Scour Depths due to Tsunami // Proc. 6th China-Japan-US Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering. 2013. P. 671–678. <https://doi.org/10.1061/9780784413234.086>
9. Tonkin S., Yeh H., Kato F., Sato S. Tsunami scour around a cylinder: an effective stress approach // Journal of Fluid Mechanics. 2003. V. 496. P. 165–192. <https://doi.org/10.1017/S0022112003006402>
10. Van Der Tempel J., Zaaijer M.B., Subroto H. The effects of scour on the design of offshore wind turbines // Proc. 3rd Int. Conf. on Marine Renewable Energy. 2004. London UK. P. 27–35.
11. Yang G., Jianhong Y. Nonlinear standing wave-induced liquefaction in loosely deposited seabed // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2017. V. 77. P. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1038-z>
12. Yeh H. Tsunami Inundation Scour of Roadways, Bridges and Foundations Observations and Technical Guidance from the Great Sumatra Andaman Tsunami // Professional Fellowship Report. 2006.
13. Yeh H., Li W. Tsunami Scour and Sedimentation // Proc. 4th Int. Conf. on Scour and Erosion. 2008, Tokyo, JP, P. 95–106.

NATURAL PROCESSES AS JUSTIFICATION FACTORS FOR DECISIONS ON PORT HYDRAULIC STRUCTURES

I. G. Kantarzhi^{a, #} and A. V. Kuprin^{a, ##}

^a Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337 Russia

[#]E-mail: kantardgi@yandex.ru

^{##}E-mail: rtyter55@gmail.com

The effects of sea waves and currents on harbour hydraulic structures are analysed from published open source data and the characteristics of scour from waves, including tsunami waves, are considered. Local bottom scour threatening the general stability of gravity-type engineering structures can arise under the effect of storm waves and currents, jets from ship propulsion devices and tsunami waves near hydraulic engineering structures. The types of scour mechanisms from sea waves have been investigated, i.e., local, general, and

overtopping scour. There is a lack of sufficient measurement data for general scour to verify the calculation methods. Generally, general scour does not damage a structure, although it can contribute to its destruction by other types of scour when they overlap. Therefore, existing studies mainly focus on the analysis of local scour. The relationship between local scour and ground liquefaction and their influence on the stability of marine hydraulic structures is established. Failure mechanisms of hydraulic structures due to erosion by tsunami waves are analyzed: leeward and seaward toe scour, crown armour failure, parapet wall failure, sliding failure. The tsunami wave scour enhancement parameter is given, which is the fraction by which the pore pressure gradient reduces the frictional forces resisting scour. Significant ground instability occurs when the scour amplification parameter Λ exceeds a value of 0.5 ($\Lambda \geq 0.5$). The parameter Λ can be used to assess areas where instantaneous liquefaction may be responsible for scour and sediment movement and to further recalculate erosion depths obtained without considering liquefaction. Liquefaction from a tsunami wave may penetrate up to 28% of the maximum erosion depth due to shear forces. The liquefaction phenomenon may occur due to a sudden drop in the water level in the area of return flow concentration. Consequently, the liquefaction phenomenon must be considered in the stability and erosion analysis around the structure.

Keywords: tsunami waves, local scour, liquefaction, offshore hydraulic structures, erosion amplification parameter

REFERENCES

1. Kuprin, A.V., Kantarzhi, I.G. *Vliyanie razzhizheniya grunta na glubinu razmyva, vyzyvaemogo volnami tsunami* [Influence of ground liquefaction on the washout depth caused by tsunami waves]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 2022, no 5. pp. 8–12. (in Russian)
2. Kuprin, A.V., Kantarzhi, I.G. *Tipy razmyvov ot voln tsunami, vozdeistvuyushchikh na gidrotekhnicheskie sooruzheniya* [Types of scour from tsunami waves affecting hydraulic structures]. *Gidrotekhnika*, 2020, no 4 (61), pp. 48–50. (in Russian)
3. Iida, T., Kure, S., Udo, K., Mano, A., Tanaka, H. Scouring mechanism around structure by return flow of tsunami considering liquefaction. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Series B2 (Coastal Engineering)*, 2015, vol. 71, pp. 241–246.
4. Kato, F., Suwa, Y., Watanabe, K., Hatogai, S. Mechanisms of coastal dike failure induced by the great East Japan Earthquake tsunami // Proc. 33rd Int. Conf. Coastal Engineering, 2012, Santander, Spain.
5. Kuprin, A.V., Novakov, A.D., Kantarzhi, I.G., Gubina, N.A. Local and general scours caused by tsunami waves. *Power Technology and Engineering*, 2021, vol. 54, no 6, pp. 836–840.
6. Kuswandi, K., Triatmadja, R., Istiarto, I. Simulation of scouring around a vertical cylinder due to tsunami. *Science of tsunami hazards*, 2017, vol. 36 (2), pp. 59–69.
7. Lim, G., Premaratne, B., Jayaratne, R., Marriott, M., Shibayama, T. Comparison of failure mechanisms of coastal structures due to the 2004 Indian Ocean and 2011 Tohoku tsunami events // Proc. 6th International Conference on Structural Engineering and Construction Management, 2015.
8. Tonkin, S., Francis, M., Bricker, J. Limits on coastal scour depths due to tsunami // Proc. Sixth China-Japan-US Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering, 2013, pp. 671–678.
9. Tonkin, S., Yeh, H., Kato, F., Sato, S. Tsunami scour around a cylinder: an effective stress approach. *Journal of Fluid Mechanics*, 2003, vol. 496, pp. 165–192.
10. Van Der Tempel, J., Zaaijer, M.B., and Subroto, H. The effects of scour on the design of offshore wind turbines // Proc. 3rd Int. Conf. on Marine Renewable Energy, 2004, London, UK, pp. 27–35.
11. Yang, G., Jianhong, Y. Nonlinear standing wave-induced liquefaction in loosely deposited seabed. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2017, vol. 77, pp. 1–19.
12. Yeh, H. Tsunami inundation scour of roadways, bridges and foundations observations and technical guidance from the Great Sumatra Andaman tsunami. Professional Fellowship Report, 2006.
13. Yeh, H., Li, W. Tsunami scour and sedimentation. // Proc. 4th Intl. Conf. on Scour and Erosion, 2008, Tokyo, JP, pp. 95–106.