

**V Всероссийская научная конференция
«ВОЛНЫ ЦУНАМИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ, ПРОГНОЗ»**

**ЭФФЕКТЫ РАЗЖИЖЕНИЯ ГРУНТА ПРИ
РАЗМЫВАХ ОТ ВОЛН ЦУНАМИ**

**Куприн Александр Васильевич
Аспирант, НИУ МГСУ
Кантаржи Измаил Григорьевич
Д.т.н., профессор, НИУ МГСУ**

Введение

Одной из причин разрушения гидротехнических сооружений, является размыв грунта основания, приводящий либо к деформациям отдельных элементов конструкции, либо к потери общей устойчивости сооружения.

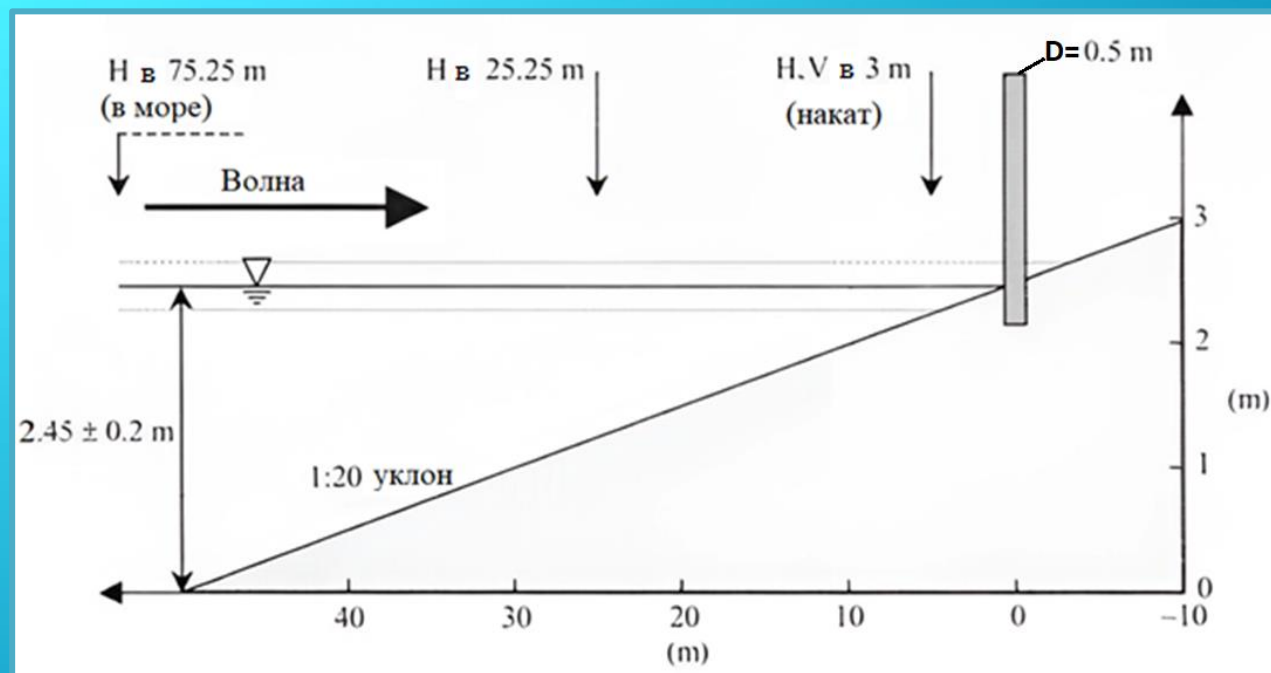
Усилению эффекта размыва может способствовать разжижение грунта. Волновое разжижение грунта морского дна создает риск для устойчивости морских сооружений. Понимание характеристик разжижения, вызванного волнами, имеет значение для проектирования морских гидротехнических сооружений.



Эксперимент Tonkin

Tonkin et al изучили на крупномасштабной модели цунами механизмы размыва, связанные с набеганием цунами на пляж, где был вертикально установлен цилиндр, и участием разжижения в данном процессе.

Масштаб модели составил 1:10 (был использован крупномасштабный лоток длиной 135 м, шириной 2 м, глубиной 5 м)



По результатам исследований было получено, что изменение скорости размыва гравия с течением времени можно описать, используя безразмерное напряжение сдвига. Однако быстрый размыв песка во время отката волны цунами нельзя объяснить таким образом. В работе Tonkin et al утверждается, что недостающим механизмом является градиент порового давления, возникающий в результате быстрого снижения давления по мере отката волны.

Параметр усиления размыва

Топкин был введен параметр усиления размыва $\Lambda(z)$, который представляет собой величину, на которую градиент порового давления уменьшает силы трения, противодействующие размыву:

$$\Lambda(z) = \frac{p_c(z) - p_c(z_0)}{\gamma_b |z - z_0|}$$

Предполагается, что быстрый размыв будет происходить на глубине z , при которой:

$$\Lambda(z) \geq \Lambda_T,$$

где Λ_T - пороговое значение Λ .

Условия усиленного размыва

Для прогнозирования глубины усиленного размыва, используя характеристики волн и грунта, применяется модель Терцаги об избыточном поровом давлении:

$$\frac{\partial p_c}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 p_c}{\partial z^2},$$

где c_v - коэффициент консолидации Терцаги:

Условие для возникновения усиленного размыва будет выполнено, если во время фазы отката поверхностное давление упадет на достаточно большую величину ΔP за достаточно короткое время ΔT . Можно вывести два критерия для глубины d_s усиленного размыва:

1. Временной масштаб ΔT должен быть достаточно коротким, чтобы скорость диффузии порового давления, определяемая через c_v , была недостаточной для того, чтобы градиент порового давления мог рассеяться на глубине d_s .

2. Общее падение давления ΔP должно быть не меньше $\Lambda_T \cdot \gamma_b \cdot d_s$, чтобы градиент избыточного порового давления $\Lambda_T \gamma_b$ сохранялся на протяжении вертикального расстояния d_s .

Определение глубины размыва от волн-цунами

На основе уравнения диффузии порового давления поровое давление определяется, как:

$$p_c(z) = 4\Delta P i^2 \operatorname{erfc} \left[\frac{-z}{2\sqrt{c_v \Delta T}} \right],$$

где $i^2 \operatorname{erfc}[\cdot]$ - второй интеграл дополнительной функции ошибки.

Поскольку

$$p_c(-d_s) - p_c(0) \equiv \Lambda(d_s) \gamma_b d_s = \Delta P \left(1 - 4i^2 \operatorname{erfc} \left[\frac{d_s}{2\sqrt{c_v \Delta T}} \right] \right),$$

то параметр усиления размыва на глубине d_s , определяется следующим образом:

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

Предел $d_s \rightarrow 0$ дает меру того, может ли произойти усиленный размыв:

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

Определение глубины размыва от волн цунами

Глубина размыва от волн цунами с учетом разжижения грунта d_s вычисляется по формуле:

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

где $i^2 \operatorname{erfc} [\bullet]$ - второй интеграл дополнительной функции ошибок, Λ - параметр усиления размыва, γ_b - удельный вес грунта во взвешенном состоянии, ΔP - изменение порового давления (эквивалентно Δh - разница высот между максимальной высотой наката и высотой наката на стадии отката цунами), ΔT - время между стадией где была достигнута максимальная высота наката во время атаки цунами и стадией отката цунами.

Определение глубины размыва от волн-цунами

Для упрощения расчетов второй интеграл дополнительной функции ошибок в уравнении был заменен аппроксимирующей формулой. Для этого используя ПК CurveExpert для значений $\frac{d_s}{2\sqrt{c_v\Delta T}}$ от 0,001 до 1,5 была получена формула:

$$y = 0.25(1 - 0.366x)^{6.25}$$

где $y = i^2 \operatorname{erfc}$, $x = \frac{d_s}{2\sqrt{c_v\Delta T}}$.

Подставляя аппроксимирующую формулу в формулу определения глубины размыва получаем:

$$d_s = \frac{\Delta P}{\Lambda \gamma_b} \left(1 - \left[1 - 0.183 \frac{d_s}{\sqrt{c_v\Delta T}} \right]^{6.25} \right)$$

Расчет параметра усиления размыва

№	h, м	H, м	ΔT , с	ΔP , кПа	ΔH_p , м	$\Lambda(0)$	Наблюдаемая глубина размыва d_s , м	$\Lambda(d_s)$
Значения в передней части цилиндра								
1	2,65	0,13	4,5	1,28	0,13	0,26	0,000	-
2	2,65	0,24	6,5	1,77	0,18	0,30	0,025	-
3	2,65	0,34	6,0	1,96	0,20	0,35	0,043	-
4	2,45	0,24	3,0	1,37	0,14	0,35	0,024	-
Значения в задней части цилиндра								
1	2,65	0,13	4,5	1,67	0,17	0,35	0,026	-
2	2,65	0,24	6,5	3,34	0,34	0,57	0,144	0,52
3	2,65	0,34	6,5	3,63	0,37	0,62	0,200	0,55
4	2,45	0,24	6,5	3,34	0,34	0,57	0,145	0,52

В таблице приведен расчет для параметра усиления размыва на поверхности осадка, $\Lambda(0)$. Результаты показывают, что $\Lambda(0)$ лежит ниже 0,5 для тех случаев, когда образуются относительно мелкие зоны размыва: в передней части цилиндра и для меньшей (13 см) волны в задней части цилиндра. $\Lambda(0)$ лежит немного выше 0,5 для трех случаев, когда во время отката наблюдается глубокая яма размыва. Из этого следует, что значительная нестабильность грунта, в которой участвует мгновенное разжижение, возникает, когда значения $\Lambda \geq 0.5$.

Сравнение глубин размыва с учетом и без учета разжижения

№	$H, \text{ м}$	$\Delta H, \text{ м}$	$\Delta T, \text{ с}$	$\gamma_b, \text{ Н/м}^3$	$\Lambda(0)$	$c_v, \text{ м}^2/\text{с}$	$d_{s,\text{реал.}}, \text{ м}$	$d_{s,\text{б.р.}}, \text{ м}$	$d_{s,\text{изм.}}, \text{ м}$
1	0.13	0.17	4.5	9123	0.344	0.08	-	0.044	0.026
2	0.24	0.34	6.5	9123	0.572	0.08	0.150	0.082	0.144
3	0.34	0.37	6.5	9123	0.623	0.08	0.197	0.116	0.200
4	0.24	0.34	6.5	9123	0.572	0.08	0.150	0.082	0.145

Для сравнения были посчитаны глубины размыва грунта с учетом разжижения, $d_{s,\text{реал.}}$ и по формуле Kuswandi были посчитаны глубины размыва грунта без учета эффекта разжижения, $d_{s,\text{б.р.}}$:

$$d_s = 0.34H$$

Значения полученные таким образом сравниваются с измеренными в эксперименте Tonkin в задней части цилиндра, $d_{s,\text{изм.}}$, т.к. там получены максимально измеренные для своего эксперимента глубины размыва грунта. Если в 1 случае, где эффект разжижения отсутствует, глубина размыва, полученная по формуле Kuswandi, превышает измеренную, то в случаях 2-4, где эффект разжижения уже присутствует, глубина размыва, по формуле Kuswandi, в 1.8 раз меньше измеренной.

Цунами в Индийском океане 2004 г., Город Банда-Ачех (Суматра, Индонезия)



До цунами, июнь 2004



После цунами, декабрь 2004

Выводы

1. Механизмы размыва от волн цунами были исследованы Tonkin et al в ходе эксперимента в крупномасштабном гидравлическом лотке, где на цилиндр, установленный на размываемом откосе, накатывалась одиночная волна цунами. Во время цунами размыв грунта происходит очень быстро, и этот фактор является наиболее значимым в описании размыва грунта от цунами.
2. Размыв грунта у цилиндрических свай можно описать с помощью стандартной модели сдвигового напряжения. Однако быстрый размыв во время отката волны цунами нельзя объяснить таким образом. Недостающим механизмом в данном случае является градиент порового давления, который приводит к мгновенному разжижению грунта.
3. Tonkin был введён параметр усиления размыва Λ , который представляет собой величину, на которую градиент порового давления уменьшает силы трения, противодействующие размыву. Значение параметра усиления размыва, при котором наблюдается усиленный размыв, полученное в ходе анализа результатом эксперимента, составляет $\Lambda \geq 0,5$.
4. Формула определения глубины размыва с учетом влияния разжижения была модифицирована с помощью ПК CurveExpert. Данная модификация позволяет упростить расчеты, путём замены второго интеграла дополнительной функции ошибки на аппроксимирующую зависимость.
5. Анализируя результаты расчетов с учётом разжижения и без учета разжижения можно сделать вывод, что мгновенное разжижение грунта может увеличить размыв не менее чем в 1.8 раз.