

Особенности обеспечения устойчивости вертикальных элементов на акватории

Никитина Т. Ю.

Государственный университет морского и речного флота

имени адмирала С.О. Макарова

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Статья посвящена изучению процессов размыва дна вблизи строящихся на акватории гидротехнических сооружений, представляющих собой вертикальные шпунтовые стенки. Рассматривается влияние скоростей потоков воды у поверхности стенки. Исследование волновых движений ведется на основании системы Навье-Стокса, уравнения непрерывности и уравнения состояния. Применяются допущения, которые позволяют получить приближенное аналитическое решение, поясняющее физическую сущность процесса.

В гидротехнике распространены вертикальные шпунтовые стенки, применяемые для строительства причалов и портов, шлюзов и молов, укрепления берегов, а также для защиты котлованов при земляных работах. Подобные конструкции на этапе строительства, могут представлять собой ряд шпунтовых стен незакрепленный на акватории. Такая практика привела к возникновению аварийных ситуаций при производстве работ на открытой морской акватории.

Водолазные обследования показали, что у основания шпунтовой стенки образовалась пазуха, при этом на внутренней стороне акватории вода представляла собой смесь воды с песком. Ряд свай лицевой стенки был подвержен циклическому волновому влиянию, основание сооружения, представляло собой мелкофракционные пески с низкими значениями физико-механических характеристик. Таким образом, выявлена необходимость обеспечения устойчивости и безопасности строящихся на акватории гидротехнических сооружений (ГТС), при этом особый интерес представляет изучение процессов размыва дна вблизи сооружений.

В первом приближении эти процессы обусловлены вытеснением частиц грунта, вызванным колебанием балки, под действием волн [1, 2] и выносом частиц, за счет воздействия скоростей воды у поверхности стенки. Аналогичные явления наблюдаются при проектировании откосных грунтовых сооружений. Для определения границы крепления откоса и обеспечения неразмываемости грунтов у основания шпунтовых стенок необходимо оценить значения фактических донных скоростей в районе заделки

шпунтовой стенки в грунт и соотнести их с неразрывающимися скоростями грунтов, слагающих дно.

При рассмотрении волновых движений принято традиционное расположение системы координат [3]. Схема задачи показана на (рис. 1).

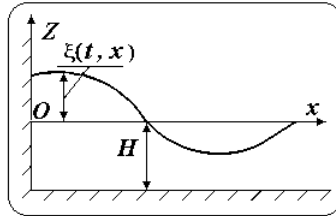


Рис. 1. Система координат и схема задачи

Водный слой характеризуют: смещением свободной поверхности воды $\xi(t, x)$, скалярным полем давления $P(t, \rho, x, y, z)$ и компонентами u , v и w векторного поля скорости течения по осям $0x$, $0y$ и $0z$ [3]. Для невязкой, несжимаемой жидкости, без учета вращения земли, уравнения Навье-Стокса, непрерывности и состояния, с граничными условиями «не протекания» и однородными начальными условиями заменяют следующей линейной системой, аналитическое решение, которой поясняет физическую сущность процесса [3, 4]

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + g, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \\ P = P(t, \rho, x, z) \end{cases} \quad (1)$$

где t и ρ – время, с и плотность среды, кг /м³; g и ω_z – ускорение свободного падения, м /с². и угловая частота вращения земли рад/с; ν , ζ – коэффициенты статической и динамической вязкости, м/с².

Наиболее интересна горизонтальная компонента скорости. Исследование системы (1) проведено на основе: теории потенциала и теории «длинных волн». В рамках потенциальной теории [3] получены следующие соотношения, автоматически удовлетворяющие условиям «не протекания» и однородным начальным условиям

$$\begin{cases} u = \frac{Agk}{\omega} Km \sin(kx) \sin(\omega t) \\ Km = \frac{\omega}{ch(2\pi(z+H)/\lambda)} / \frac{\omega}{ch(2\pi H/\lambda)}, \end{cases} \quad (2)$$

где A , λ и H – амплитуда, длина волны и глубина акватории, м; Km – коэффициент уменьшения амплитуды скорости в зависимости от глубины и длины волны; ω и k – угловая частота волны, рад/с, и волновое число, м⁻¹.

Величина горизонтальной компоненты скорости, полученная на основе теории «длинных волн» [4] соответствует выражениям (2) при условии $Km = 1$. Взаимодействие фронтально подходящих волн с вертикальной стенкой эквивалентно встречному взаимодействию волн [5, 6], при котором образуется стоячая волна с амплитудой, близкой к двойной амплитуде подходящей волны [6]. В работах [7, 8] приведены выражения для скорости волновых движений, полученные для плоских волн с учетом вязкости и нелинейных взаимосвязей переменных. Из этих формул в пределе при $\nu \rightarrow 0$, с учетом сдвига фазы получена формула

$$u = Ue^{-\alpha t} e^{-kz} \sin(kx) \sin(\omega t), \quad (3)$$

где U , W и α – амплитудные значения скоростей, м/с и логарифмический декремент затухания, с⁻¹, соответственно.

Выражения (2), (3) структурно близки. Однако, линеаризованная модель приводит к замкнутым траекториям движений, в то время как фактические траектории близки к спиральям, что обусловлено вкладом добавочного дрейфового течения [9]. В случае, когда горизонтальная скорость превышает величину, допустимую по условию размыва дна, потребуются дополнительные меры по укреплению ГТС.

Рассмотрим частный случай задачи при глубине акватории $H = 5$ м, амплитуде $A = 0,5$ м и длине волны $\lambda = 10$ м, и угловой частоте волны $\omega = 4,4$ рад/с. Фазовая скорость такой волны составляет около 7 м/с, и является типичной, так как она близка к характерной скорости ветра на поверхности. Зависимости коэффициента Km при $\lambda = \text{const}$ и $H = \text{const}$ показаны на рис. 2, а, б.

Горизонтальная скорость в придонном слое составила $U \approx 0,06$ м/с, что близко к предельно допустимой величине для мелкодисперсного грунта. При более жестких режимах волнения скорости частиц с высокой вероятностью превысят скорости размывания грунта. Для рассмотренного частного случая выполнено численное моделирование. Была рассчитана следующая начально-краевая задача

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{2\pi g A}{\lambda} \sin(\omega t) \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \\ u(0, x) = 0; u(t, 0) = 0 \\ 0 \leq x \leq \lambda; 0 \leq t \leq 2\pi / (\omega\lambda) \end{cases}$$

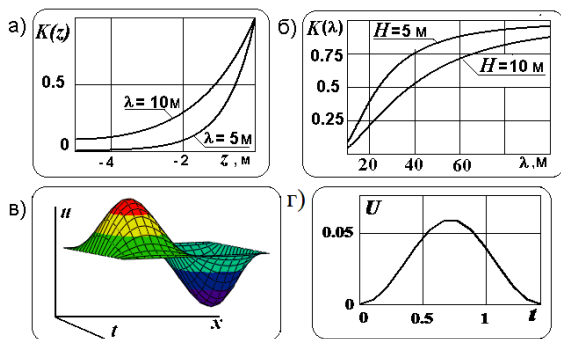


Рис. 2. Зависимости коэффициента Km : а – $\lambda = \text{const}$; б – $H = \text{const}$

Результат расчета представлен на рис. 2, в, г. Получена максимальная скорость в придонном слое $U = 0,059 \text{ м / с}$. Расхождение с линейной моделью не превысило 3,3 %, что подтверждает допустимость линейного приближения в рассмотренной задаче.

Поскольку волновые движения воды в окрестности шпунтовых стенок, наряду с колебаниями таких стенок под воздействием волн и вытеснением частиц грунта из полости в районе защемления шпунта в грунт являются существенной составляющей процесса образования воронки размыва целесообразно включать расчет этих движений в общую математическую модель физического явления. С этой целью востребованы дальнейшие исследования волновых движений с учетом свойств грунтов и типичных волновых режимов, характерных для конкретных регионов и водоемов.

Литературы

1. Никитина, Т. Ю. Проблема обеспечения устойчивости вертикальной шпунтовой конструкции на этапе строительства / Т. Ю. Никитина // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сб. науч. тр. / ГУМРФ им. Адмирала С. О. Макарова; под ред. Г. Л. Гладкова, К. П. Моргунова. – СПб., 2021. – Ч. 2, № 5. – С. 82–87.

2. Никитина, Т. Ю. Определение средних скоростей потока у основания шпунтовой стенки при образовании воронки / Т. Ю. Никитина // Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России: материалы III межвуз. науч.-практ. конф. студ. и аспирантов / ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова. – СПб., 2013. – С. 46–50.
3. Сретенский, Л. Н. Теория волновых движений жидкости / Л. Н. Сретенский. – М.: Наука, 1977. – 816 с.
4. Носов, М. А. Введение в теорию волн цунами / М. А. Носов – М.: Янус-К, 2019. – 170 с.
5. Родин, А. А., Динамика длинных волн в прибрежной зоне моря с учетом эффектов обрушения / А. А. Родин, Е. Н. Пелиновский. – Н. Новгород: НГТУ, 2014. – 93 с.
6. Чижиумов, С. Д. Проблемы гидродинамики корабля (численное моделирование) / С. Д. Чижиумов. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО КНАГТУ, 2016. – 122 с.
7. Баринов, В. А. Распространение волн по свободной поверхности вязкой жидкости / В. А. Баринов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2010. – Вып. 2. – С.18–31.
8. Басинский, К.Ю. Траектории частиц вязкой жидкости при волновом движении / К. Ю. Басинский // Вестник удмуртского университета. – 2015. – Т. 2, вып. 2. – С. 248–253.
9. Белоножко, Д. Ф. О расчете скорости переноса вещества периодическими волнами, распространяющимися по поверхности вязкой жидкости / Д. Ф. Белоножко, А. В. Козин // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80, вып. 4. – С. 32–40.

УДК 627

Опыт и перспективы возведения наплавных конструкций транспортно-энергетических ГТС

Гарибин П. А., Федяшов А. В.

Государственный университет морского и речного флота
им. адмирала С. О. Макарова
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрены примеры реализованных на практике транспортно-энергетических гидротехнических сооружений, возведенных на внутренних водотоках и прибрежных зонах морей РФ. Приведены габаритные параметры использованных наплавных элементов. Обобщен опыт и проведен анализ методологии строительства. Предложены варианты эколо-