

## ОСОБЕННОСТЬ ВОЗВЕДЕНИЯ ОГРАДИТЕЛЬНОГО ВОЛНОЛОМА НА ВОДОНАСЫЩЕННЫХ СЛАБЫХ ГРУНТАХ

**Осадчий В.С.**, к.т.н., доцент,

**Анисимов К.И.**, доцент,

**Бондаренко А.С.**, к.т.н.,

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*

*cross@ogasa.org.ua*

**Аннотация.** Первоначально была проведена верификация расчетной компьютерной модели. В рамках проведенного исследования обоснована необходимость возведения конструкции волнолома по этапам, определены размеры этапов. На основании выполненных численных экспериментов проведен анализ осадок, сроков консолидации, коэффициента устойчивости, полученных для каждого этапа. При выполнении численных экспериментов были использованы разные модели грунтов. Дополнительно были учтены сейсмические нагрузки, для которых тоже были получены значения напряженно-деформированного состояния конструкции волнолома и основания.

**Ключевые слова:** сложные инженерно-геологические условия, водонасыщенные грунты, оградительный волнолом, расчетное обоснование, этапы возведения, модели поведения грунтов.

## ОСОБЛИВІСТЬ ЗВЕДЕННЯ ОГОРОДЖУВАЛЬНОГО ХВИЛЕЛОМА НА ВОДОНАСИЧЕНИХ СЛАБКИХ ГРУНТАХ

**Осадчий В.С.**, к.т.н., доцент,

**Анісімов К.І.**, доцент,

**Бондаренко А.С.**, к.т.н.,

*Одеська державна академія будівництва та архітектури*

*cross@ogasa.org.ua*

**Анотація.** Спочатку була проведена верифікація розрахункової комп'ютерної моделі. В рамках проведеного дослідження обґрунтовано необхідність зведення конструкції хвилелому по етапах, визначені розміри етапів. На підставі виконаних чисельних експериментів проведено аналіз осідання, термінів консолидації, коефіцієнта стійкості, отриманих для кожного етапу. При виконанні численних експериментів були використані різні моделі ґрунтів. Додатково були враховані сейсмічні навантаження, для яких теж були отримані значення напружено-деформованого стану конструкції хвилелому та основи.

**Ключові слова:** складні інженерно-геологічні умови, водонасичені ґрунти, огороджувальний хвилелом, розрахункове обґрунтування, моделі поведінки ґрунтів.

## PECULIARITIES OF CONSTRUCTING OF A PROTECTIVE SEAWALL ON WATER BEARING SOFT SOILS

**Osadczy W.S.**, PhD., Assistant Professor,

**Anisimov K.I.**, Assistant Professor,

**Bondarenko A.S.**, PhD.,

*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*

*cross@ogasa.org.ua*

**Abstract.** A technological sequence error of constructing a facility on soft soil leads, as a rule, to accidents and structure damage. Many authors and researchers give insights into the issues associated with construction on soft soils, but the literature quantity on designing and construction of hydro-technical structures on soft soils is limited. Therefore, the goal of the paper is formulated the following: analysis of peculiarities of constructing a seawall on soft water bearing soils. The feature of this article is the fact that the research has been done during real construction of a seawall. A structure of the Quarantine Seawall at Odessa Sea Commercial Port was studied within correction activities of the design «Construction of a container terminal on the Quarantine Sea Commercial Port through creation of an artificial water zone». Total length of the construction is 900 m. Work results are given only for this facility. Information on engineering-and-geological conditions and seawall structure is given as well. A method of computerized model verification is initially described. The possibility of «quick» constructing a facility is evaluated; a number of numerical experiments to split the construction process into stages is carried out. Results of determining settlement, terms of consolidation, and stability coefficients for each stage of seawall construction are given in tabular form. Seismic conditions were considered in calculations as well. Main figures and further research stages are given in conclusions.

**Keywords:** complex engineering-and-geological conditions, water bearing soils, protective seawall, design basis justification, construction stages, soil performance models.

**Постановка проблеми.** Строительство зданий и сооружений сопряжено со многими сложностями, как при проектировании, так и при строительстве. При этом все участники строительного процесса заинтересованы в получении максимальной прибыли за минимальный срок. Однако, строительство сооружений на площадках со сложными инженерно-геологическими условиями влечет за собой дополнительные затраты как материальных ресурсов, так и временных. При этом, попытка сэкономить либо нарушить технологическую последовательность возведения сооружения на слабых грунтах приводит, как правило, к авариям и повреждениям конструкций. Принимая во внимание существующий накопленный опыт, научные исследования и развитие вычислительных комплексов возможно при проектировании и расчетном обосновании оптимально рассчитать этапы и временной интервал возведения сооружения на слабых водонасыщенных грунтах.

**Анализ последних исследований и публикация.** Грунты по своим структурам относятся к дисперсным системам. В глинистых грунтах деформирование под действием статической нагрузки обусловлено, главным образом, взаимным перемещением твердых частиц. Различают объемные деформации и деформации формоизменения грунтов. Объемная сжимаемость глинистых водонасыщенных грунтов возможна при отжатию воды из пор грунта [1]. Процесс деформации водонасыщенных грунтов рассмотрен в работах многих исследователей [2-4]. Так же достаточно много работ посвящено консолидации грунтов [5, 6]. Есть теоретические исследования, посвященные изменению модуля деформации при консолидации водонасыщенных грунтов [7]. Достаточно много работ, в которых отражены исследования строительства зданий на слабых грунтах [8] и способов ускорения консолидации [9], но очень ограничена информация о строительстве гидротехнических сооружений, основанием для которых служат водонасыщенные грунты [10].

**Цель и задачи.** Принимая во внимание выше сказанное, цель данной работы была сформулирована как: анализ особенностей возведения оградительного волнолома при строительстве на слабых водонасыщенных грунтах. Для достижения поставленной цели, тезисно, можно сформулировать ряд задач:

- получение адекватной натуре расчетной модели;
- выполнить ряд численных экспериментов для определения этапов возведения конструкции волнолома и его объема;
- анализ изменения физико-механических характеристик и осадок волнолома.

**Результаты исследований.** Особенность данной работы заключается в том, что исследования были выполнены при строительстве реального сооружения – оградительного

волнолома.

Рассматривалась конструкция оградительного волнолома на Карантинном молу ГП ОМТП в рамках корректировки проекта «Строительство контейнерного терминала на Карантинном молу ГП ОМТП за счет искусственно образованной акватории». Общая длина сооружения составляет 900м. Сооружение разбито на 4 участка: участок 1 – северная голова – длина 90 м – из массивов-гигантов (МГ); участок 2 – длина 510 м – откосного типа; участок 3 – длина 210 м – на участке МГ; участок 4 – длина 90 м – южная голова, возведенная из массивов-гигантов.

Так как полученный материал имеет значительные объемы, то в тексте статьи результаты представлены только для одной скважины и для одного расчетного профиля. В рамках данной работы представлен профиль в соответствии с участком № 2. Конструкция оградительного волнолома участка №2 представлена на рис. 1.

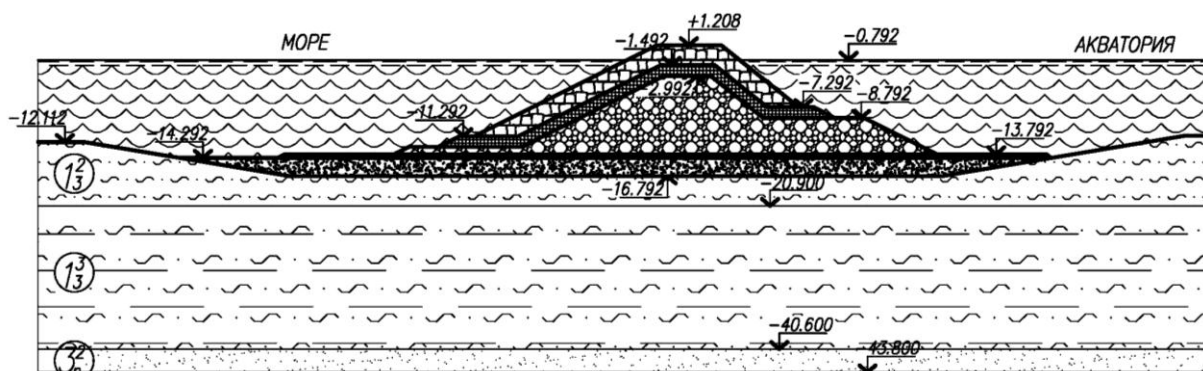


Рис. 1. Конструкция оградительного волнолома на Карантинном молу ГП ОМТП на участке №2

С целью обоснования полученных результатов и оценки их достоверности, расчеты по определению напряженно-деформированного состояния грунтового массива параллельно выполнялись с применением инженерных методов и расчетных комплексов, которые реализуют эти методы, а также конечно-элементных вычислительных комплексов.

В основе определения напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового массива лежат модели поведения грунтов основания и материалов конструкций. При этом, от адекватности принятых моделей в полной мере зависит достоверность получаемых результатов расчетов [10]. Модель материала – это система математических уравнений, описывающих зависимость между напряжениями и деформациями. Модели материалов часто выражаются в виде уравнений, задающих связь между бесконечно малыми приращениями напряжений (или скоростями изменения напряжений) и бесконечно малыми приращениями деформаций (или скоростями деформаций). Все модели материалов, используемые в программе «Plaxis», основаны на зависимости между скоростью изменения эффективных напряжений и скоростью деформаций [11].

Оценка достоверности и адекватности представленных расчетных моделей верифицировалась в соответствии с нивелировкой построенных секций волнолома. Сопоставление результатов выполнялась для участка №2 (рис. 1) с учетом времени в 270 дней.

В предлагаемой плоской модели перемещения верха секции волнолома составили 1,37м, а по результатам нивелировки – 1,25м. Полученная разность составляет ~10%. Полученная разность может быть обоснована тем, что характеристики материалов каменной постели были приняты по справочным данным, а физико-механические характеристики грунтов – по усредненным показателям в соответствии с инженерно-геологическими изысканиями. Принимая вышесказанное, разработанные схемы (модели грунтов) были оценены как адекватные и соответствующие реальной работе сооружения.

При современном уровне развития вычислительной техники существуют возможности корректно моделировать поведение того или иного вида грунта, но при этом возникают сложности при вводе параметров материалов, т.к. результаты инженерно-геологических изысканий зачастую не содержат необходимых параметров грунтов, поэтому параллельно с

конечно-элементными методами расчета используются инженерные методы расчета.

Первоначально была выполнена оценка возможности «быстрого» строительства волнолома. Таким образом, для скважины №8: величина конечной осадки  $s=4,99\text{м}$ ; значение коэффициента безопасности  $K=0,37\leq 1$ . Следовательно, при быстрой отсыпки без дополнительных мероприятий устойчивость насыпи не будет обеспечена. Следовательно, строительство волнолома в виде насыпи при отсутствии дренирования по этапам, обосновано. Принимая во внимания рекомендации [10] данная конструкция отнесена к типу П-Б по способу возведения и обеспечения устойчивости, так как начальное значение коэффициента безопасности при быстрой отсыпки находится в диапазоне  $0,2\leq K < 1$ . Тип конструкции волнолома П-Б характерен существующей необходимостью в послойном формировании тела волнолома, т.е. преобладающие деформациями грунта при быстрой отсыпке – сдвига (выдавливанию) заменяем деформациями сжатия при медленной отсыпке.

Возможность оптимальной разбивки процесса возведения (формирования) тела оградительного волнолома сопровождалась рядом всевозможных расчетов с различными вариантами объема и количества этапов. В процессе работы оценивалось напряженное состояние грунтового массива, величина осадок по этапам, устойчивость, сроки консолидации. Перечисленные параметры определялись с учетом и без учета компрессионных испытаний грунтов, предоставленных Заказчиком. В итоге было выделено 4 основные этапа формирования тела волнолома для участка №2 оградительного сооружения.

Так как конструкция, в соответствии имеет откосный тип, то рекомендуется выполнять подсыпку на строительный подъем после формирования осадок каждой стадии (*postfactum*). Данное положение продиктовано, невозможностью корректно определить величину осадки, вследствие следующих причин:

- при инженерно-геологических изысканиях были указаны значения коэффициентов фильтрационной консолидации довольно в широких пределах;
- принимая опыт строительства дорожных насыпей в обводненных недренированных грунтах, наблюдается образование т.н. «корки» или иначе говоря, верхнего слоя консолидированного грунта, препятствующего оттоку воды, а, следовательно, и консолидации нижележащих слоев.

Расчет выполнялся с учетом и без учета георешеток. Так же рассматривался вариант с досыпкой грунта после I-го этапа на величину строительного подъема.

При этом, расчеты этапов возведения оградительного волнолома выполнялись по инженерно-геологическим данным предоставленными Заказчиком и предоставленным компрессионным испытаниям грунтов.

Первоначально определялось напряженное состояния грунтового массива от давления каменной нагрузки и выделяли области напряжений. В соответствии с паспортами компрессионных испытаний грунтов строились графики повышения прочностных свойств грунта, в зависимости от напряжений. Далее для определенных областей напряжений выполнялась замена прочностных характеристик с последующим выполнением расчетов устойчивости по двум методикам: круглоцилиндрических поверхностей (КЦПС); по фиксированным плоскостям скольжения (ФПС).

В общем случае решение задачи по обеспечению устойчивости основания насыпи осуществляется в два этапа:

- 1 – оценивается возможность выдавливания «слабого» грунта основания;
- 2 – разрабатываются мероприятия для его предотвращения.

Расчеты устойчивости для промежуточных фаз формирования тела оградительного волнолома выполнялись при сейсмических воздействиях с интенсивностью 7 баллов, в соответствии с [12] как для временного сооружения. Устойчивость 4 стадии – при сейсмических воздействиях с интенсивностью 8 баллов.

Анализ полученных результатов расчета в соответствии с определенными этапами выполнялся по ряду параметров, которые, для удобства, были сведены в таблицы 1-3 и представлены ниже.

Дополнительно контроль полученных результатов напряженно-деформированного состояния и времени консолидации выполнялся вручную. При этом получаемая сходимостъ результатов соответствует точности инженерных расчетов.

Таблица 1 – Величины осадок этапов формирования тела оградительного волнолома для скважины №8

Наименование параметров	Этапы формирования тела волнолома			
	I этап	II этап	III этап	IV этап
Параметры, полученные в результате ручного счета				
Осадка (м) (метод послойного суммирования)	0,97	1,25	2,28	3,53
Осадка (м) (метод послойного суммирования) с учетом изменения физико-механических свойств грунта при консолидации	0,68	0,74	1,87	2,72
Величина конечной осадки (м), без учета изменения физико-механических свойств грунта при консолидации	1,73	2,25	3,58	4,99
Величина конечной осадки (м), с учетом изменения физико-механических свойств грунта при консолидации	1,4	1,75	2,47	3,29
Параметры, полученные в результате использования Plaxis, модель грунта – Mohr-Coulomb				
Осадка (м)	0,965	1,05	2,27	3,26
Осадка (м) с учетом длительности фазы	–	1,62	2,74	3,52
Осадка (м) с геосинтетическим материалом	0,85	0,944	1,76	2,09
Осадка (м) с учетом длительности фазы и геосинтетическим материалом	–	1,6	1,98	2,98
Параметры, полученные в результате использования Plaxis, модель грунта – Soil soft model				
Осадка (м)	0,72	1,6	2,43	2,67
Осадка (м) с учетом длительности фазы	0,98	2,0	2,54	2,76
Осадка (м) с геосинтетическим материалом	0,411	1,1	1,78	2,21
Осадка (м) с учетом длительности фазы и геосинтетическим материалом	0,421	1,45	1,91	2,5

Таблица 2 – Сроки консолидации в соответствии с этапами формирования тела оградительного волнолома скважины №8

Наименование параметров	Этапы формирования тела волнолома				
	I этап	II этап	III этап	IV этап	Общий срок
Параметры, полученные в результате использования Plaxis, модель грунта – Mohr-Coulomb					
Время консолидации при средних значениях коэффициента фильтрации	1	3,9	3,12	2,15	10,2
Время консолидации при учете геосинтетического материала при максимальном значении коэффициента фильтрации	1	2,4	2,0	1,2	6,6
Параметры, полученные в результате использования Plaxis, модель грунта – Soil soft model					
Время консолидации при средних значениях коэффициента фильтрации	1	1,9	2,1	1,7	6,7
Время консолидации при учете геосинтетического материала при максимальном значении коэффициента фильтрации	1	1,5	1,4	1,0	4,9

Таблиця 3 – Значения коэффициентов устойчивости в соответствии с этапами формирования тела оградительного волнолома скважины №8

Наименование параметров	Этапы формирования оградительного волнолома			
	I этап	II этап	III этап	IV этап
Методика круглоцилиндрических поверхностей скольжения				
При ориентировании оползневого тела в сторону акватории интенсивность 7 баллов	1,127	1,752	1,196	–
При ориентировании оползневого тела в сторону моря интенсивность 7 баллов	1,325	1,627	1,155	–
При ориентировании оползневого тела в сторону моря интенсивность 8 баллов	–	–	–	1,078
При ориентировании оползневого тела в сторону моря интенсивность 8 баллов	–	–	–	1,059
По фиксированным плоскостям скольжения				
При ориентировании оползневого тела в сторону акватории сейсмическая интенсивность 7 баллов	1,143	1,809	1,284	–
При ориентировании оползневого тела в сторону моря интенсивность 7 баллов	1,314	1,921	1,435	–
При ориентировании оползневого тела в сторону акватории сейсмическая интенсивность 8 баллов	–	–	–	1,088
При ориентировании оползневого тела в сторону моря интенсивность 8 баллов	–	–	–	1,132

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Окончательные цифры, полученные в работе и их оценка представлена в заключительной части данной статьи в виде выводов:

1. При рассмотрении разреза откосного сооружения с учетом геологических напластований предложено 4 основных стадий формирования тела ограждающего волнолома. При этом, первая стадия соответствует существующей ситуации, т.е. каменной постели, выполненной до отметки  $-8,792\text{м}$ . Вторая стадия формирования тела волнолома до отметки  $-7,292\text{м}$  с учетом фактически полученных осадок. Третья стадия до отметки  $-2,992\text{м}$  с учетом фактически полученных осадок. Четвертая стадия до отметки  $+1,208\text{м}$  с учетом фактически полученных осадок. Окончательная досыпка выполняется до отметки  $+1,208\text{м}$  после стабилизации осадки.

2. Предлагаемый профиль был скорректирован. Необходимо произвести пригрузку с морской стороны и со стороны акватории порта слоем песка с защитой поверхности щебнем слоем  $300\text{мм}$  до отметки  $-11,292\text{м}$ ; длина пригрузки составляет около  $30\text{м}$  с каждой стороны.

3. Расчетное сопротивление грунта составляет  $-236,14\text{кПа}$ , при этом максимальные напряжения под подошвой конструкции волнолома ( $186,4\text{кПа}$ ), не превышают определенного значения расчетного сопротивления. Расчетное сопротивление грунта определялось с учетом повышения прочностных характеристик грунтов вследствие консолидации и пригрузки песком.

4. Суммарная осадка, принятая в расчетах с учетом консолидации, составляет  $2,67\text{м}$ . Осадка для каждой стадии соответственно составляет  $0,718\text{м}$ ,  $1,31\text{м}$ ,  $2,23\text{м}$  и  $2,67\text{м}$ .

5. Общее время консолидации, определенное в соответствии с предоставленными инженерно-геологическими условиями для скважины №8, составляет  $6,6$  года. Продолжительность первого этапа составляет  $1$  год, второго –  $2,4$  года, третьего –  $2,0$  года, четвертого  $1,2$  года.

6. Время продолжительности каждой стадии может быть скорректировано, опираясь на результаты геодезических наблюдений с учетом фактически полученных осадок по этапам консолидации грунтов основания.

7. Коэффициент устойчивости для последней стадии с учетом сейсмических воздействий интенсивностью 8 баллов составляет для случая ориентировании оползневого тела в сторону акватории 1,078; для случая ориентировании оползневого тела в сторону моря 1,059. При этом, величина коэффициента устойчивости для аварийного сочетания нагрузок составляет 1,05. Коэффициент устойчивости определялся с учетом повышения прочностных характеристик грунтов вследствие консолидации.

В заключении следует отметить, что с момента строительства волнолома велись геодезические наблюдения. Был выполнен анализ величин фактических осадок и осадок, полученных при численных экспериментах и расчетного обоснования. Полученные результаты будут отражены в последующих работах.

### Литература

1. Флорин В. А. Основы механики грунтов / В. А. Флорин. – М.: Госстройиздат, 1959. – 357 с.
2. Ухов С. Б. Механика грунтов, основания и фундаментов / С. Б. Ухов. – М.: Высшая школа, 2007. – 566 с.
3. Цытович Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цытович. – М.: Издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1953. – 633 с.
4. Шаповал А.В. Алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния обладающих свойством ползучести водонасыщенных грунтовых оснований методом граничных элементов / А. В. Шаповал // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – К.: НДІБК, 2006. – №65. – С. 305-310.
5. Дасибеков А.Д. О некоторых задачах механики уплотняемых сред и ее практическое применение / А.Д. Дасибеков, М.Ж. Бердыбаева, А.П. Сейткалиев // Наука и образование Южного Казахстана. Сер. Механика и машиностроение. – Шымкент, 2000. – С. 167–169.
6. Шаповал В.Г. Применение обобщенных функций в теории консолидации многослойных сред / В.Г. Шаповал, С.П. Кандзюба // Интенсификация рабочих процессов строительного производства. – Киев, 1992. – С. 57-62.
7. Дасибеков А. Консолидация упругого грунта, модуль деформации которого меняется во времени / А. Д. Дасибеков, А.А. Юнусов, Б.Р.Арапов, Н.А. Куатбеков, А.А. Юнусова, Г.Д. Тажбенова, Г.К. Нурмаганбетова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 9. – С. 8-13.
8. Швец В.Б. К вопросу фильтрационной консолидации слоистых оснований / В.Б. Швец, В.Г. Шаповал, С.П. Кандзюба, С.О. Поповиченко // Сб. трудов Российской конференции по механике грунтов и фундаментостроению «Геотехника-95». – СПб, 1995. – т.4. – С. 706-710.
9. Кисляков А.А. Применение вертикальных дренажей при уплотнении слабых водонасыщенных грунтов / А.А. Кисляков, В.П. Грахов, Ю.Г. Кислякова. – Интеллектуальные системы в производстве, 2014. – №1(23). – С.124-126.
10. Осадчий В.С. Оценка напряженно-деформированного состояния системы «основание-гидротехническое сооружение» / В.С. Осадчий, А.С. Бондаренко // Світ Геотехніки. – 2017. – №2(54). – С. 14-18.
11. Шашкин А.Г. Вязко-упруго-пластическая модель поведения глинистого грунта / А.Г. Шашкин // Развитие городов и геотехническое строительство. – СПб.: Изд-во «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2011. – №2. – С. 1-32.
12. Строительство в сейсмических районах Украины: ДБН В.1.1-12:2014. – [действительный с 2014-01-10]. – Киев: Минстрой Украины, 2014. – 84 с.

Стаття надійшла 1.05.2018