

ОСАДЧИЙ В.С., к.т.н., доцент,
БОНДАРЕНКО А.С., ассистент

Одесская государственная академия строительства и архитектуры cross@inbo.ru

УДК 626/627

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «ОСНОВАНИЕ-ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СООРУЖЕНИЕ»

Ключевые слова: гидротехническое сооружение, сложные инженерно-геологические условия, модель грунтового основания, верификация расчетных моделей, оградительный волнолом.

У роботі представлений підхід до оцінки напружено-деформованого стану системи «основа-гідротехнічна споруда» з верифікацією розрахункових моделей при розгляді конструкції захисного хвилерізу. Розглянуто підхід до аналізу компресійних випробувань ґрунтів і застосування цих даних для різних моделей ґрунтової основи. Виконано порівняльний аналіз ряду моделей і визначено оптимальний спосіб зведення обраної конструкції хвилерізу.

В работе представлен подход к оценке напряженно-деформированного состояния системы «основание-гидротехническое сооружение» с верификацией расчетных моделей при рассмотрении конструкции оградительного волнолома. Рассмотрен подход к анализу компрессионных испытаний грунтов и применения этих данных для различных моделей грунтового основания. Выполнен сравнительный анализ ряда моделей и определен оптимальный способ возведения выбранной конструкции волнолома.

The paper presents an approach to the evaluation of the stress-strain state of "base-hydraulic structure" system with verification of computational models when considering the design of the protective breakwater. The approach to the analysis of the compression tests of soils and the use of these data for various subgrade models. A comparative analysis of a number of models and determine the best way of erection of the chosen design of the breakwater.

Строительство гидротехнических сооружений, как правило, приурочено к сложным инженерно-геологическим условиям. При этом, применение существующих мощных современных конечно-элементных комплексов, в которых реализованы различные модели грунтового основания, парализовано отсутствием необходимой исходной информации. Таким образом, разработка подходов к оценке напряженно-деформированного состояния системы «основание-гидротехническое сооружение» является актуальной задачей для инженеров и исследователей.

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[1]. Модель материала – это система математических уравнений, описывающих зависимость между напряжениями и деформациями[2]. 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 [2].

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.

Таким образом, в данной работе представлен комплексный подход к расчету системы «основание-гидротехническое сооружение», на примере, конструкции оградительного волнолома на Карантинном молу ГП ОМТП.

В тексте данной статьи результаты исследований представлены фрагментарно и только для одного участка оградительного волнолома по одной из скважин инженерно-геологического разреза. Конструкция рассматриваемого участка длиной 540м представлена на рис. 1.

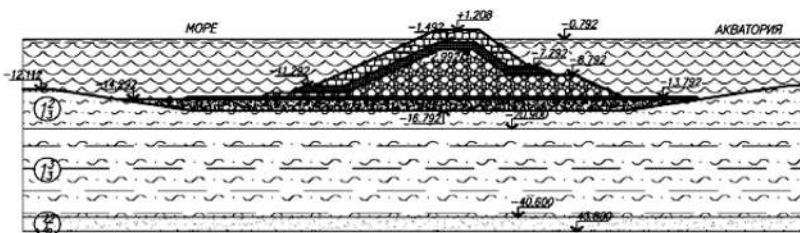


Рис 1. Конструкция оградительного волнолома на Карантинном молу ГП ОМТП.

В предлагаемой плоской модели перемещения верха секции волнолома составили 1,37м, а по результатам нивелировок существующего сооружения – 1,25м. Полученная разность составляет ~10%, что может быть обосновано 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 [3]. Принимая вышесказанное, разработанные схемы (модели грунтов) были оценены как адекватные и соответствующие реальной работе сооружения.

Согласно исходным данным, начальная отметка дна находилась на уровне – 12,112м. Были выполнены работы по дноуглублению до отметки – 16,792м. На момент расчетных работ устроена песчаная подушка и каменная постель до отметки – 8,792м.

На первом этапе был выполнен ряд расчетов предлагаемой конструкции волнолома для определения возможности быстрого возведения данного сооружения, т.е. условно мгновенного возведения, в соответствии с рекомендациями [4]. При этом, оценка устойчивости основания выполняется с целью определения возможности бокового выпирания слабого грунта основания под воздействием нагрузки от веса

насыпи. В связи с этим оценка устойчивости основания выполнялась для двух состояний:

- для условий быстрой отсыпки насыпи (условно мгновенной), при которой грунт основания не успевает консолидироваться и повысить свою природную прочность;
- для условий медленной отсыпки насыпи, при которой передача нагрузки осуществляется по мере увеличения прочности грунта в результате его консолидации под предыдущей ступенью нагрузки.

Таким образом, величина конечной осадки $s=4,99\text{м}$; значение коэффициента безопасности $K_{без}=0,37\leq 1$. Следовательно, при быстрой отсыпки без дополнительных мероприятий устойчивость насыпи не будет обеспечена.

При этом устойчивость конструкции волнолома при быстрой отсыпке, т.е. почти мгновенной, параллельно определялась в Slide. Результаты расчета устойчивости конструкции волнолома без учета сейсмических воздействий представлены на рис. 2.

Минимальный коэффициент устойчивости при быстром возведении волнолома без учета сейсмических воздействий, определенный в Slide составляет 0,713.

Строительство волнолома в виде насыпи при отсутствии дренирования по этапам, обосновано. Принимая во внимания рекомендации [4] данная конструкция отнесена к типу II-Б по способу возведения и обеспечения устойчивости, так как начальное значение коэффициента безопасности при быстрой отсыпке находится в диапазоне $0,2\leq K_{нач}^{без} < 1$. Тип кон-

струкции волнолома II-Б характерен существующей необходимостью в послойном формировании тела волнолома, т.е. преобладающие деформациями грунта при быстрой отсыпке – сдвига (выдавливания) 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. В итоге было выделено 4 основные этапа формирования тела волнолома. Распределение на этапы:

- первый этап – разработка котлована и укладка каменной постели до отметки – –8,792м, т.е. существующее состояние каменной наброски;
- второй этап – досыпка на величину фактически полученной осадки за период существования конструкций;

выполнение пригрузочных слоев из песка мощностью 3м на величину по 30м в каждую сторону от проектного края подготовки из песка с защитным слоем

Рисунком 2 дивись на стор. 3 обкл.

из щебня слоем 300мм, отметка поверхности защитного слоя -11,3м;

формирование тела волнолома до отметки -7,292м.

– третий этап – досыпка каменной наброски на величину фактической осадки;

формирования тела волнолома до отметки -2,992м.

– четвертый этап – досыпка каменной наброски на величину фактически полученной осадки;

формирования тела волнолома до отметки +1,208м; окончательная досыпка до отметки +1,208м после полного затухания осадок.

При рассмотрении каждого из этапов определялись следующие параметры:

- осадка определялась с учетом предыдущей стадии; отдельно от данной стадии; осадка при консолидации; осадка с учетом изменения модуля деформации;
- время консолидации при изменении величины порового давления до 1 кН/м^2 ;
- величина расчетного сопротивления грунта;
- устойчивость конструкции с учетом и без учета изменения значений прочностных характеристик грунтов в соответствии с напряженным состоянием.

Напряжения (кН/м^2) от собственного веса грунта рассчитанных вручную, представлено в виде эпюр напряжений под характерными точками (рис. 3). Напряжения от собственного веса грунта в виде изополей напряжений полученных в Plaxis представлено на рис. 4.

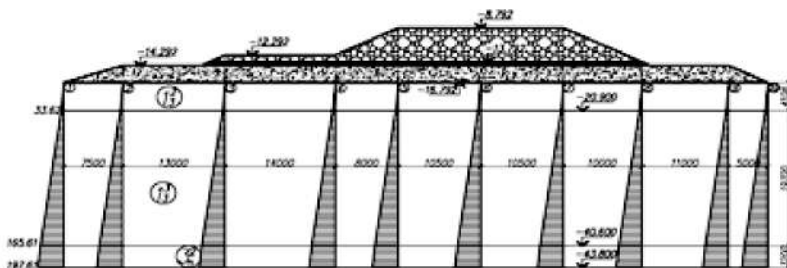


Рис 3. Распределение напряжений в грунтовом массиве под характерными точками от собственного веса грунта

Так как в Plaxis эффективные напряжения представлены как сумма напряжений от собственного веса грунта и напряжения от внешней нагрузки, то значения напряжений отдельно от насыпи будут получены путем вычета величин напряжений от собственного веса грунта. Оценивая напряжения, можно отметить, что разность в величинах, полученных при расчете вручную и определенных в Plaxis, составляет менее 5%, что приемлемо для инженерных расчетов.

Далее определялись величины осадок методом послойного суммирования с учетом величины сжимающей толщи. Таким образом, величина конечной осадки для первого этапа возведения конструкции оградительного волнолома составила $s=1,73\text{м}$. При этом величина конечной осадки вследствие консолидации и достижения минимального порового да-

Рисунки 4, 5, 6 дивись на стор. 3 обкл.

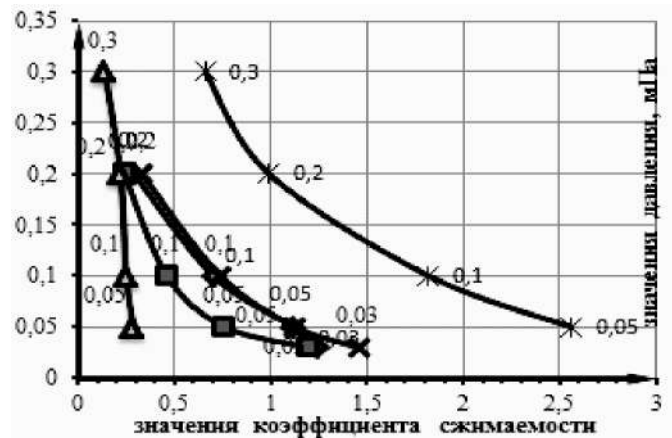


Рис 7. Графики зависимости коэффициента сжимаемости от напряжений для грунта 1^3_2

вления в 1 кН/м^2 в Plaxis составляет $1,14\text{м}$ (рис. 5). Продолжительность консолидации соответствует коэффициенту фильтрации при напряжении в массиве грунта $0,05 \text{ мПа}$, $K_f=3,7 \cdot 10^{-3} \text{ м/сут}$. Значения осадки на момент исследований, т.е. через 365 дней, определенной в Plaxis, представлены на рис. 6.

Разность в полученных величинах осадки, которые определены разными способами, обусловлена тем, что с процессом консолидации происходит повышение модуля деформации грунта, что учитывается в Plaxis. Данное положение отчетливо прослеживается и при расчетах консолидации, которые представлены ниже.

Рассматривалась еще одна модель, реализованная в Plaxis – Softsoil. Трудность в использовании данной модели заключается в принятии характеристик грунта, которые имеют значительный диапазон. При этом разброс зависимостей имеют хаотичный характер

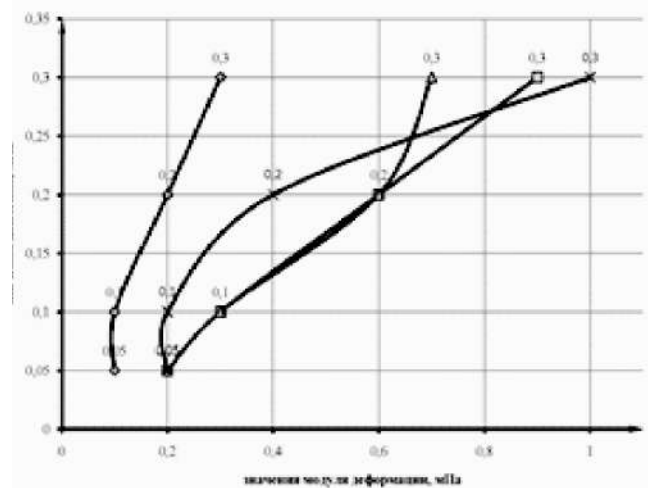


Рис 8. Графики зависимости модуля деформации от напряжений для грунта 1^3_2

Таблица 2. Величины осадок в соответствии с этапами формирования тела ограждающего волнолома

Наименование параметра	Этапы формирования тела ограждающего волнолома			
	I этап	II этап	III этап	IV этап
Параметры, полученные в результате ручного счета				
Осадка (м), определенная по формуле 8 (методом послойного суммирования)	0,97	1,25	2,28	3,53
Осадка (м), определенная по формуле 8 (методом послойного суммирования) с учетом изменения физико-механических свойств грунта при консолидации	0,68	0,74	1,87	2,72
Величина конечной осадки (м) определенная по формуле 4, без учета изменения физико-механических свойств грунта при консолидации	1,73	2,25	3,58	4,99
Величина конечной осадки (м) определенная по формуле 4, 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 – Soilsoftmodel				
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 3. Сроки консолидации в соответствии с этапами формирования тела ограждающего волнолома

Наименование параметра	Этапы формирования тела ограждающего 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 – Soilsoftmodel					
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

Таблица 4. Значения коэффициентов устойчивости в соответствии с этапами формирования тела ограждающего волнолома

Наименование параметра	Этапы формирования тела ограждающего 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

3. Книга 4 Материалы изысканий (инженерно-геологические условия) к проекту «Строительство 1-ой очереди (гидротехнические сооружения) контейнерного терминала на Карантинном молу ГП ОМТП за счет искусственно образованной акватории (корректировка)», выполнен.
4. Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых основаниях: пособие к СНиП 2.05.07-85.:М.-Минтранс России, 2004.-313с .

и не зависят от глубины и расположения скважины. Поэтому в соответствии с паспортом компрессионных испытаний грунтов построены изменения физико-механических характеристик грунтов при консолидации.

Графический материал изменения коэффициента сжимаемости в зависимости от давления для грунта 1³, представлен на рис. 7.

Следует отметить, что при уточнении осадок и сроков консолидации были выполнены аналогичные пошаговые изменения и модуля деформации. Графический материал полученный по паспорту грунта для зависимости напряжений и модуля деформации для грунта 1³, представлен на рис. 8.

Анализ полученных результатов расчета в соответствии с определенными этапами выполнялся по следующим параметрам, представленными в табл. 2, 3, 4.

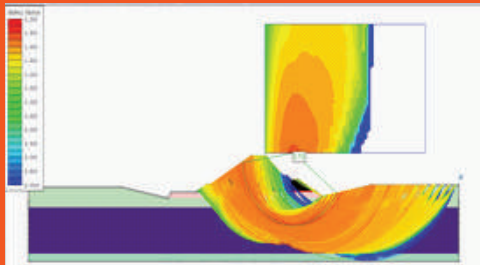
ВЫВОДЫ:

Следует отметить, что представленный подход к оценке напряженно-деформированного состояния был апробирован на ряде гидротехнических сооружений и показал свою эффективность. При рассмотрении сложной системы бывает не достаточным рассмотрение только одной модели, а уникальность данной работы заключается в возможности верификации результатов расчетов при наблюдении за реальным сооружением и принятии результатов как достоверных.

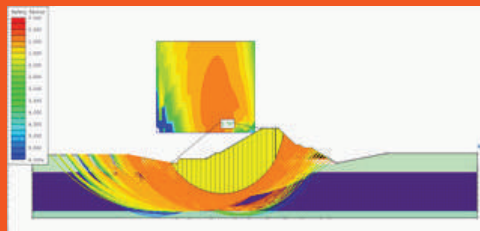
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шашкин А.Г. Вязко-упруго-пластическая модель поведения глинистого грунта/А.Г. Шашкин.- Развитие городов и геотехническое строительство №2. СПб.: Изд-во "Геореконструкция-Фундаментпроект", 2011. с. 1-32.
2. Салимгариева Н.И. Выборы модели грунта для выполнения геотехнических расчетов в программном комплексе Plaxis/Н.И. Салимгариева, С.В. Калошина.

**РИСУНКИ К СТАТЬЕ ОСАДЧИЙ В.С., БОНДАРЕНКО А.С.
«ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «ОСНОВАНИЕ-ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СООРУЖЕНИЕ»**



в сторону акватории порта



в сторону моря

Рис. 2. Коэффициент устойчивости без учета сейсмических воздействий по методу круглоцилиндрических поверхностей.

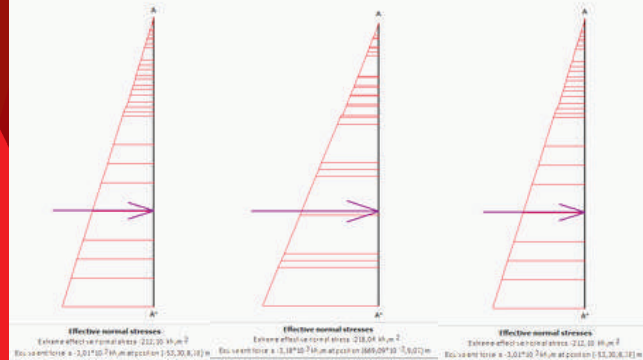
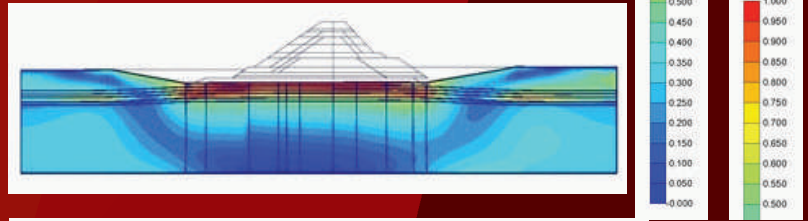


Рис. 4. Распределение напряжений (кН/м²) в грунтовом массиве в виде изополей от собственного веса грунта (Plaxis) с учетом открытия котлована.

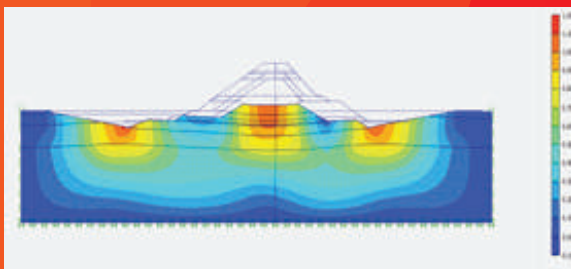


Рис. 5. Изополя распределение перемещений в грунтовом массиве от каменной постели.

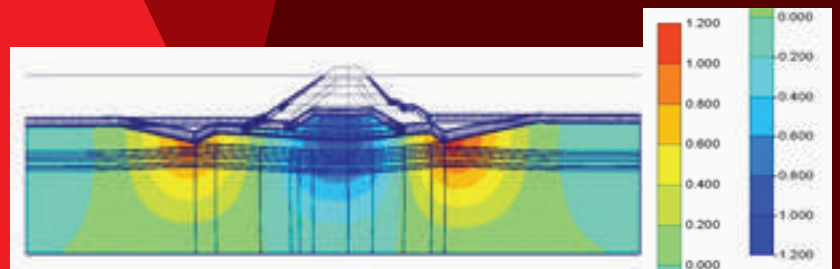


Рис. 6. Изополя распределение перемещений в грунтовом массиве от каменной постели через 365 суток.

**РИСУНКИ К СТАТЬЕ СУХАНОВ В.Г., ВЫРОВОЙ В.Н., ЛЫСЕНКО Е.В.
«ПОТЕМКИНСКАЯ ЛЕСТНИЦА: ПО СТУПЕНЯМ СКВОЗЬ ВРЕМЯ (РЕСТАВРАЦИЯ 2016-2017г.г.)»**



Рис. 1.



Рис. 2.



Рис. 3.



Рис. 4.



Рис. 5.



Рис. 6.