

ОДЕССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА  
И АРХИТЕКТУРЫ

На правах рукописи

МЕЛЬЦОВ  
Геннадий Иванович



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ИСКУССТВЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ  
МОРСКИХ ПОРТОВ, ОБРАЗОВАННЫХ ПРОДУКТАМИ УТИЛИЗАЦИИ  
ГЛИНИСТЫХ МОРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ

Специальность 05.23.02- "Основания и фундаменты"  
(специализация - гидротехнические сооружения)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Одесса 1996

АВ 34.977

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Черноморнииiproекте, и Одесской государственной академии строительства и архитектуры

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Школа А.В.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор Швец В.Б.  
кандидат технических наук  
доцент Омельченко Ю.М.

Ведущая организация - Ильичевский морской торговый порт

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00760304 (K)

Защита диссертации состоится "18" листопада 1996 г. в 13 часов на заседании специализированного совета К 05.09.01 Одесской государственной академии строительства и архитектуры по адресу: 270029, Одесса, ул. Дидрихсона, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесской государственной академии строительства и архитектуры по адресу: Одесса, ул. Дидрихсона, 4.

Автореферат разослан " " 1996 г.

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

Ученый секретарь специализированного ученого совета, кандидат технических наук, доцент

Реброва В.В.

Актуальность. Вопросы прогнозирования деформаций оснований, сложенных естественными слабыми водонасыщенными грунтами разрабатывались многими отечественными и зарубежными учеными: Абелевым М.Ю., Барроном К., Бельским А.И., Базиным Л.Б., Брониним В.Н., Будиним А.Я., Вотяковым И.Ф., Вяловым О.С., Гольдиным А.Л., Зерацким Ю.К., Казагранде, Малышевым М.В., Марченко А.С., Месчаном С.Р., Посуховским А.К., Рендуликом, Строгановым А.С., Сорокиной Г.В., Тер-Мартirosяном Э.Г., Флориним В.А., Цытовичем Н.А., Шваном В.Б. и Шаповалом В.В., Школой А.В., Щукле Л. и др. Однако, деформации искусственных оснований, образованных слабыми водонасыщенными грунтами утилизированными в береговые отвалы (при создании водных подходов) рассматривались крайне редко, в связи с чем практически отсутствуют регламентирующие положения нормативных документов, позволяющих выполнять проектирование. Кроме того, в практике морского фундаментостроения общепринятым является замена слабых грунтов. Требования охраны водной среды предполагают значительные затраты на утилизацию этих отложений. Поэтому актуальным является учет работы искусственных оснований не только в составе вновь образованных территорий, но и в качестве составного элемента заполнений и оснований портовых береговых и морских сооружений.

Цель работы и задачи исследований. Целью диссертационной работы является разработка на базе теоретических и экспериментальных исследований практического метода прогнозирования деформированного остояния слабых водонасыщенных оснований и расположенных на них портовых сооружений в процессе их возведения и эксплуатации.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести анализ известных теоретических исследований работы слабых водонасыщенных оснований, а также теоретических и экспериментальных исследований существующих расчетных моделей слабых оснований.

2. Обработать результаты, выполненных Черноморским проектом экспериментальных исследований, работы слабых водонасыщенных грунтов при различных режимах приложения нагрузки.

3. На основе анализа экспериментальных исследований разработать эффективную расчетную модель слабого основания.

4. Найти пути численной реализации полученных решений.

5. Разработать алгоритмы и написать программы для ЭВМ с целью реализации предложенных методов расчета слабых оснований портовых сооружений в инженерной практике.

6. Исследовать влияние степени уплотнения слабых водонасыщенных прослоек в основаниях больверков на усилия в их элементах.

**Объекты и методы их исследований.** Объектом исследования является консолидация слабых водонасыщенных грунтов, находящихся в основаниях портовых сооружений. Изучение осуществлялось путем обработки материалов более 200 одометрических испытаний лиманно-морских илистых отложений нарушенной и ненарушенной структуры. Обработка производилась на ЭВМ, с использованием разработанного аналитического метода определения текущего значения коэффициента консолидации. Для оценки стохастических аспектов использованы методы теории вероятности и математической статистики. С использованием вариационных методов произведено сравнение результатов, получаемых разработанным методом, с линейным методом расчета

и результатами натурального эксперимента.

**Личный вклад соискателя.**.. Автором разработаны:

1. Метод определения коэффициента консолидации по данным лабораторных испытаний.

2. Инженерный метод прогнозирования деформаций слабых водонасыщенных оснований морских портов.

3. Аналитическое и численные решения основного уравнения.

4. Алгоритмы и программы для ЭЭМ, реализующие предложенный метод расчета слабых оснований портовых сооружений в инженерной практике.

5. Защищенное авторским свидетельством разгрузочное устройство для набережных на слабых грунтах.

**Научная новизна.** 1. Разработан метод определения текущих значений коэффициента консолидации по результатам одометрических испытаний.

2. На основе обработки данных экспериментов получены зависимости изменения коэффициента консолидации во времени и по пространственным координатам.

3. Получено аналитическое и численные решения основного уравнения для решения практических задач в рассматриваемой постановке.

4. В результате численного эксперимента получены зависимости влияния степени уплотнения слабых водонасыщенных прослоек в основаниях больверков на усилия в их элементах.

5. Получено техническое решение, защищенное авторским свидетельством, позволяющее повысить несущую способность больверков на слабых грунтах.

**Достоверность результатов исследований.** Проведено сравнение результатов расчетов, получаемых при использовании

предложенного метода и линейного метода, с результатами крупномасштабного натурного эксперимента.

**Практическая ценность.** Предложенный метод расчета слабых оснований портовых сооружений позволяют точнее предсказать их деформации во времени, за счет чего, в ряде случаев, достигается снижение материалоемкости сооружений, времени предпостроечного уплотнения слабых оснований портовых территорий и гидроствалов продуктов морского глинистого дноуглубления.

Проведенный численный эксперимент показывает влияние степени уплотнения слабых прослоек в основаниях больверков на усилия в их элементах, что позволяет в ряде случаев снизить их материалоемкость.

Разработанное программное обеспечение позволяет сократить время проектирования, увеличить его точность и многовариантность.

**Внедрение.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательской работы кафедры механики грунтов и надежности сооружений ОГАСА.

Метод расчета слабых оснований внедрен при проектировании фундаментов под основания ветроагрегатов, устанавливаемых на ограждающем молу Новороссийского СРЗ.

Разработанное программное обеспечение получило внедрение в практике проектирования Черноморниипроекта.

**Апробация.** Результаты работы докладывались на научно-технических конференциях молодых ученых и специалистов Черноморниипроекта, Одесса, 1986г., профессорско-преподавательского состава ОГМУ, 1987-1989г., ОГАСИЛ, 1994 г., на всесоюзной конференции: "Проблемы проектирования, строительства, реконструкции и технической эксплуатации водно-транспортных гидротехнических сооружений." Москва-Одесса 1989.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 6 печатных работ, в том числе, получено авторское свидетельство на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работе на 169 страницах, содержит 2 таблицы, 28 рисунков и 3 приложения на 18 сраницах. Список использованной литературы включает 203 работы.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность выполненных исследований, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

Первая глава посвящена исследованию изменения деформативно-прочностных характеристик лиманно-морских глинистых отложений нарушенной и ненарушенной структуры в процессе уплотнения. В качестве исходных данных принимались материалы выполненных Черноморским проектом в 70-90 гг одометрических испытаний. Изучены зависимости изменения коэффициента консолидации во времени, от нагрузки, по глубине сжимаемой толщи, изменение прочностных характеристик при уплотнении. Для более точного определения коэффициента консолидации в работе предложен новый метод обработки консолидационных кривых. Метод заключается в дифференцировании дискретной функции данных одометрических испытаний, полученной путем экстраполяции результатов экспериментальных данных рациональной функцией наилучшей в смысле метода наименьших квадратов, (рис. 1.) Этим методом на ЭВМ были обработаны более 200 консолидационных кривых. Анализ более 100 видов интерполирующих функций для рассмотренных кривых показал, что наилучшей с точки зрения метода наименьших квадратов описывающей одо-

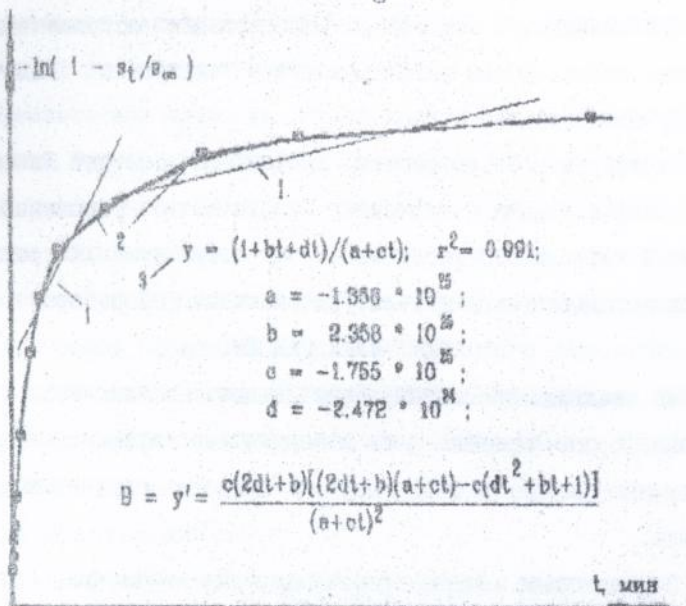


Рис. 1. Определение углового коэффициента: 1- по четырем точкам (метод А Нейлора - А.С.Строганова), 2 - аппроксимация функцией 3 (предлагаемый метод);  $r^2$  - среднеквадратическое отклонение.

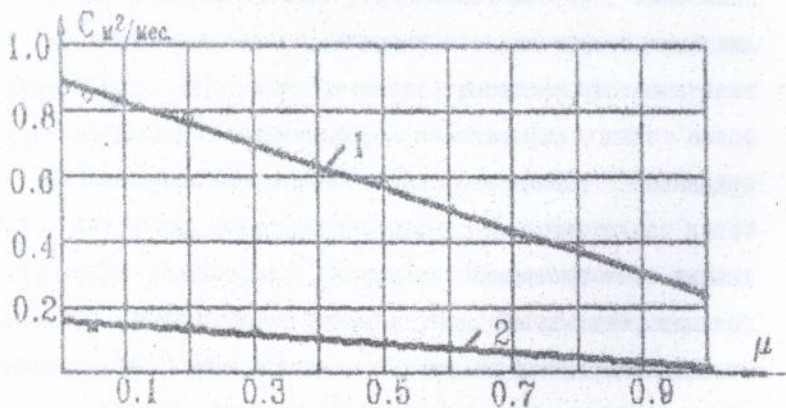


Рис. 2. Зависимость коэффициента консолидации  $C$  от степени консолидации для глинистого ила ненарушенной структуры - 1, нарушенной структуры - 2.

метрические кривые является функция

$$y = \frac{1 + bt + dt^2}{a + ct} \quad (1)$$

где  $a, b, c, d$  — параметры консолидационной кривой.

Формулу для определения величины углового коэффициента в любой момент времени можно получить продифференцировав по  $t$  уравнение (1). Отыскание параметров функции (1) для уравнения конкретной кривой можно производить методом наименьших квадратов аналитически, как это показано в работе, либо, при наличии ПЭВМ, с помощью известных программ STATGRAF, REAKFIT, TABLCURVE и аналогичных.

Величина коэффициента консолидации изменяется при уплотнении от фиксированного начального, к конечному значению. При этом характер изменения коэффициента консолидации в зависимости от степени консолидации близок к линейному для проанализированных данных, (рис.2).

При обработке определялись среднеквадратические отклонения и дисперсия коэффициента консолидации. Изменение коэффициента консолидации во времени, ввиду значительных величин среднеквадратических отклонений наблюдаемых осадок, носит явно выраженный вероятностный характер. Ошибки при испытаниях, как правило, близки нормальному закону распределения вероятностей. Определение коэффициента консолидации должно производиться по возможно большему числу испытаний.

Вторая глава посвящена выводу основного уравнения нелинейной теории консолидации. Выполненный анализ современного состояния вопроса прогнозирования деформаций территорий, сложенных слабыми грунтами, позволил выделить место разрабатываемого метода расчета среди существующих. При уплотнении присутствует как фильтрационная фаза, так и фаза ползучести, поэтому, при разработке математической модели в

работе рассмотрены как реологическое, так и фильтрационное направления теории консолидации и вывод основного уравнения получен для каждого из них.

В основу полученных решений положена, нашедшая подтверждение в первой главе, предложенная проф. А.В.Школа предположка об изменении коэффициента консолидации не только во времени, но и по пространственным координатам. Физическая модель уплотняемой толщи изображена на рис. 3. Как показал выполненный в первой главе анализ экспериментальных данных, в момент приложения нагрузки уплотнение грунта, находящегося на контакте с дренирующей поверхностью, происходит практически мгновенно и грунт переходит в пластическую стадию деформирования, в то время как вдали от дренирующей поверхности еще не началась фильтрационная фаза уплотнения.

Полученное основное уравнение консолидации имеет вид

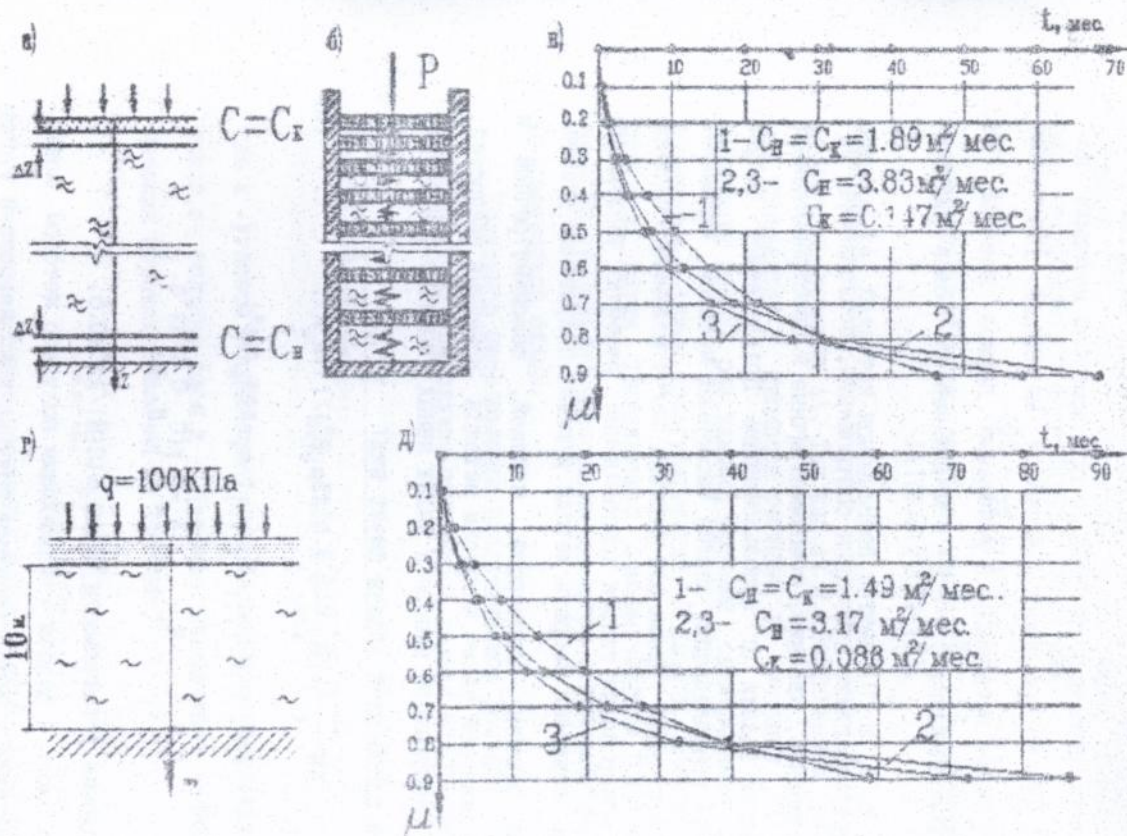
$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ C(H) \frac{\partial H}{\partial z} \right], \quad (2)$$

где  $t$  - время,  $H$  - избыточный напор,  $C(H)$  - коэффициент консолидации.

В отличие от линейной модели, коэффициент консолидации в предлагаемой модели переменный не только во времени, но и в фиксированный момент времени в каждой точке пространственных координат. Он может определяться по результатам обработки стандартных одометрических испытаний путем обработки всей одометрической кривой - как участка фильтрационной фазы уплотнения, так и фазы ползучести. На основании результатов обработки лабораторных испытаний определены пределы изменения коэффициента консолидации:

$$C(H) = \eta + \nu H, \quad (3)$$

$$\text{где } \eta = C_{\kappa_1} \frac{C}{-q_1} \frac{-\kappa_1}{q_a - q_1} + \frac{C}{q_a - q_1} \frac{-\kappa_1}{q_a} q_a; \quad (4)$$



а) - физическая модель, б) - литологическая модель, г) - расчетная схема, д) - результаты расчета: 1 - по нормативной, 2 - по величинной, 3 - по предлагаемой методикам.

Рис. 3. Сравнительный метод расчета водонасыщенных глинистых оснований. Модели и результаты расчетов.

$$v = \frac{C_{нл} - C_{к1}}{H_0} \cdot q_1 + \frac{C_{нл} - C_{н1} - C_{вл} - C_{к1}}{(q_n - q_1) H_0} \cdot q + q_n \frac{C_{нл} - C_{н1} - C_{вл} - C_{к1}}{(q_n - q_1) H_0} \quad (5)$$

$C_{н}$  и  $C_{к}$  - соответственно начальный и конечный коэффициенты консолидации при соответствующей ступени нагрузки  $q$ .

Расчеты оснований на ПЭРМ по предложенной методике показывают, что по сравнению с линейной методикой уплотнение протекает более интенсивно в начальный период времени (до степени консолидации 0.7-0.8) и медленнее на более позднем этапе.

В третьей главе приведены соотношения, позволяющие решать одномерные, плоские, осесимметричные и пространственные практические задачи с использованием предлагаемой теории нелинейной консолидации. Анализ численных методов применяемых в настоящее время для решения задач механики сплошной среды и обзор задач теории консолидации, решенных численными методами, позволил выбрать методы решения полученных уравнений. Так, решения одномерной, плоской, осесимметричной и пространственной задач получены методом конечных разностей. Функция избыточного напора в узлах явных конечно-разностных схем для одномерной задачи имеет вид:

$$H_{t, i+1} = (H_{t, i} - \alpha_1 A - 0.25 \alpha_2 B^2) / (1 + \alpha_2 A), \quad (6)$$

где

$$A = H_{t, i} - H_{t, i+1} - H_{t, i-1}; \quad \alpha_1 = \Delta t C_{н} / \Delta z^2;$$

$$B = H_{t, i+1} - H_{t, i-1}; \quad \alpha_2 = \Delta t \gamma (C_{н} - C_{к}) / \Delta z^2 q.$$

Условие устойчивости схемы  $\Delta t C(H) / \Delta z^2 \leq 0.5$ .

Решение плоской задачи консолидации получено методом конечных элементов с использованием подхода применяемого в теории поля. Минимизация функционала полной потенциальной энергии процесса уплотнения, описываемого уравнением (2), приводит к

следующей системе дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial}{\partial t}([C](\phi)) + [K](\phi) + (F) = 0 \quad (7)$$

В работе рассматривается решение с использованием линейного плоского трехузлового треугольного конечного элемента. Матрица коэффициентов консолидации имеет вид:

$$[C] = \frac{1}{2\lambda} \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

В окончательном виде, система уравнений (7) принимает вид

$$[A](\phi) = [P](\phi) - (F). \quad (8)$$

Матрица [A] является комбинацией матриц [C] и [K] и зависит от шага по времени  $\Delta t$ . Так как  $\Delta t$  и коэффициенты консолидации изменяются в процессе решения, то матрицу [A] следует вычислять всякий раз заново, проводя суммирование по всем элементам и затем триагуляризацию. В данной работе решение получено путем приближенной замены частной производной по времени ее конечно-разностным аналогом с применением конечно-разностной схемы.

Полученное приближенное аналитическое решение основного уравнения (4) для случая одномерной задачи уплотнения имеет вид

$$H(t, z) = - \frac{\eta}{2(2e^{-\alpha z} - 1)} \frac{1}{\exp\left(t \frac{\eta + 2\alpha e^{\alpha} (2e^{-\alpha z} - 1) - \alpha}{1 - e^{-\alpha z}} - k\right) - 1}. \quad (9)$$

где  $\alpha$  - угловой коэффициент определяемый по результатам испытаний,  $z$  - толщина слоя,  $k$  - уравнение описывающее характер изменения поровых давлений по глубине

$$k = -\ln\left(1 - \frac{\eta \eta}{Q \nu} \frac{1 - \bar{\sigma}^{\alpha z}}{2(2e^{-\alpha z} - 1)}\right). \quad (10)$$

Четвертая глава посвящена практической реализации полученных решений. На основе полученных соотношений разработаны алгоритмы и программы решения одномерной и осесиммет-

ричной задач методом конечных разностей, плоской задачи методом конечных элементов.

Программы решения одномерной и осесимметричной задач консолидации позволяют получать значения напоров в узлах конечно-разностной сетки и времени, при котором степень консолидации сжимаемой толщи равна 0.1-0.9 для многослойных анизотропных оснований. Программа решения осесимметричной задачи позволяет подбирать шаг и эффективный диаметр дрэн. Программе решения плоской задачи консолидации методом конечных элементов KONPL позволяет определить поровые давления, силы и перемещения в узлах.

Для анализа результатов расчетов по предложенной методике и результатов расчетов по линейной теории с результатами крупномасштабного натурального эксперимента были выполнены расчеты осадок во времени запроектированного Союзморнии-проектом оградительного мола откосного типа из каменной наброски в порту Латакия (САР) на илах мощностью до 16м, наблюдения за осадками которого выполнялись в течение длительного периода времени. Кривые, построенные по результатам расчетов по предложенной методике, удовлетворительно согласуются с результатами наблюдений за осадками и заметно ближе к натурным, нежели кривые рассчитанные по линейной методике.

Исследовано влияние степени уплотнения слабых прослоек в основании тонких подпорных стенок на усилия в их элементах. Для оценки влияния места расположения, мощности и степени уплотнения прослоек слабых грунтов в основаниях больверков проведен численный эксперимент и было выполнено более 100 расчетов методом конечных элементов и методом Блума-Ломейера. Влияние прослойки слабого грунта для гибких больверков наиболее существенно при ее расположении в зоне по-

верхности дна, для жестких больверков слабая прослойка оказывает наибольшее влияние при ее крайних положениях - в области острия свай и у поверхности дна. Усилия в элементах гибкого больверка линейно возрастают пропорционально увеличению толщины прослойки слабого грунта. Повышение прочностных характеристик слабой прослойки в процессе уплотнения при введении сооружения для однородного грунта в наилучшего его расположения в ряде случаев приводит к увеличению несущей способности лицевой стенки больверка до 20%. (рис.4).

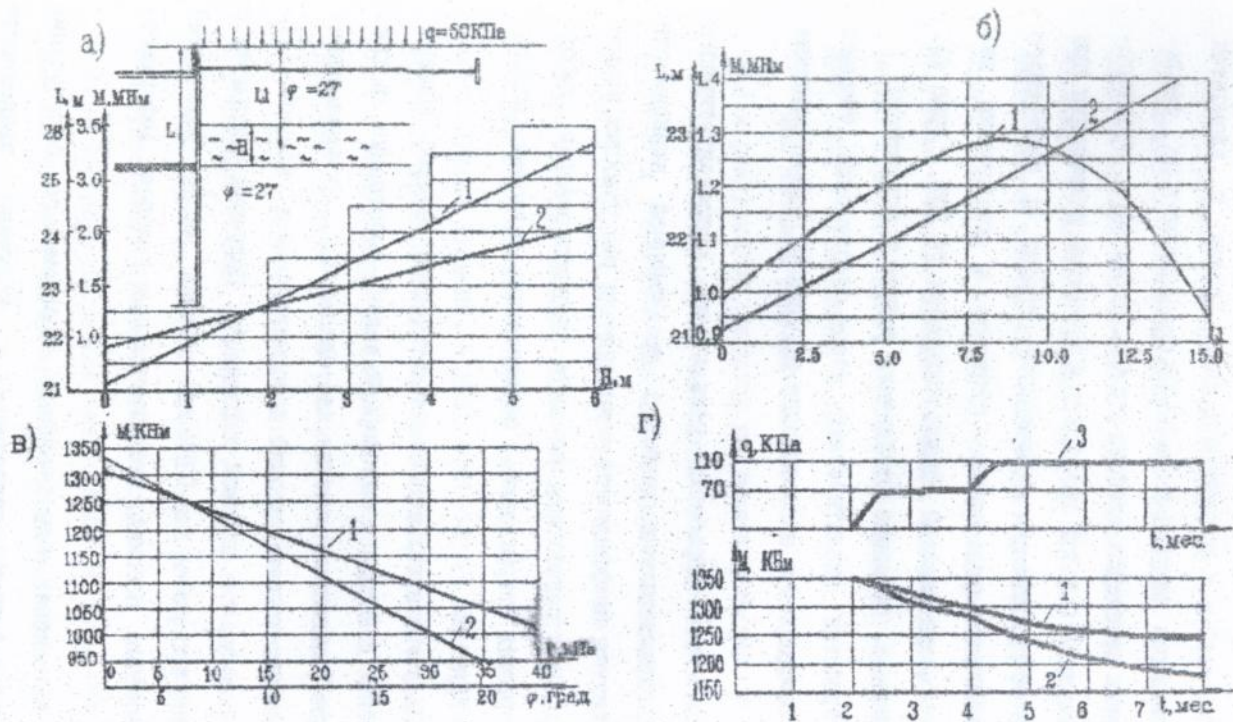
**Выводы.** Основные результаты работы в следующем!

1. Разработан аналитический метод определения текущих значений коэффициента консолидации по данным одометрических испытаний.

2. На основе обработки результатов репрезентативного объема экспериментальных данных и предложенной зависимости об изменчивости коэффициента консолидации как функции времени и координат, разработана методика прогнозирования деформаций портовых территорий, образованных слабыми водонасыщенными грунтами.

3. Получено приближенное аналитическое решение основного уравнения для случая одномерной задачи уплотнения, а также конечно-разностные решения для одномерных, осесимметричных, пространственных условий деформирования и конечно-элементные решения для плоской деформации. Получены алгоритмы и составлены программы для ЭВМ для решения задач уплотнения при одномерных, плоских, осесимметричных условиях деформирования

4. На основе разработанного программного обеспечения проведен численный эксперимент и получены зависимости влияния характера и скорости уплотнения слабых водонасы-



Влияние толщины  $H$  - а) и расположения  $L_1$  - б) слабой прослойки на глубину погружения пилота  $L$  и величинугибающего момента  $M$  в) - зависимость  $M$  от прочностных характеристик прослойки г) - снижение максимального  $M$  в процессе возведения бьефка  $q$  - нагрузка от отсыпаемой во времени  $t$  засыпки.

Рис. 4. Влияние консолидации слабой прослойки в процессе возведения бьефка на его несущую способность.

ценных оснований больверков на усилия в их элементах.

5. Разработано и защищено авторским свидетельством устройство для увеличения несущей способности больверков на слабых грунтах.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Щола А.В., Мельцов Г.И. Конечно-разностные решения уравнений теории фильтрационной консолидации слабых водонасыщенных оснований // Инженерное развитие морских портов: Тр. ОИИМФ. М.: В/О "Мортехинформреклама", 1988, с.27-33.

2. Эрих Роман, Мельцов Г., Георги Първанов, Никола Благоевич Рациональные конструкции гидротехнических сооружений на реке Дунай и особенности их расчета. VII Международная научно-прикладная конференция "Современные технологии в транспортном строительстве". Секция 2 "Пристаньное строительство" Варна. "Транспортно строительство", София, 1989, с.88-91, 293-298.

3. Мельцов Г.И., Зарицкий А.В. Разгрузочное устройство для набережной. Авторское свидетельство N 1707124, кл. Е 02 В 3/06, 1989.

4. Мельцов Г.И., Пойнер М.Б. Оценка общей устойчивости сооружений эстакадного типа с учетом сейсмических воздействий. // Морские порты: Инженерные сооружения и средства механизации. - М.: В/О "Мортехинформреклама", 1989, - с.20-22 (ОИИМФ).

5. Мельцов Г.И. Вопросы теории фильтрационной консолидации слабых оснований в нелинейной постановке // Проектирование строительства морских портовых сооружений: Сб. научн. тр. / Союзморинишпроект. М.: В/О Мортехинформреклама, 1990, с. 82-90.

6. Meltsov G.I. Uso de los territorios portuarios creados por los suelos del dragado y su argumentation de calculo. II Evento internacional de la tecnica portuaria. La Habana, Cuba 1989, p.51.

СНИИ им. В. Стефанника  
АН Укрїни

Мельцов Г.І. Прогнозування деформацій штучних територій морських портів, утворених продуктами утилізації глинистих морських відкладень.

Дисертація у вигляді рукопису на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.23.02 - Підвалини та фундаменти (спеціалізація - гідротехнічні споруди) Одеська державна академія будівництва та архітектури. Одеса, 1996.

Захищається інженерний метод прогнозування деформацій слабких водонасичених підвалин морських портів. У основі методу полягає передумова про нелінійний характер змінення коефіцієнта консолідації у процесі ущільнення як за часом так і за просторовими координатами. Приведені експериментальні підтвердження запроваджених передумов, зрівняння результатів розрахунків виконаних запропонованим методом з натурними даними.

Forecasting of artificial territories differentiations of sea-ports, created by the utilized products of sea clayed deposits.

Thesis submitted of the candidates of science degree on speciality 05.23.02 Bases and fundaments (specialization on hydrotechnical constructions) Academy of Buildings and Architecture of Odessa, Odessa 1996.

Manuscript thesis for defending, in which outlayed engineering method of forecasting of deformation of weak water-saturated bases of sea-ports constructions. In the principle of method lies the precondition that modification coefficient of consolidation has in the process of consolidation not only in time-process but also in space coordinates. In this work are given experimental proves of input preconditions, comparison of results of calculations fulfilled by the method proposed with natural data.

Ключові слова: ТЕОРІЯ КОНСОЛІДАЦІЇ, ПРОГНОЗ ДЕФОРМАЦІЙ, КОЕФІЦІЄНТ КОНСОЛІДАЦІЇ, УЩІЛЬНЕННЯ, СЛАБКІ ВОДОНАСИЧЕНІ ГРУНТИ

Подп. к печати 14.05.96г. Формат 60x84 1/16.  
Объем 0,7 уч.изд.л. I, Оп.л. Заказ №426. Тир. 100 экз.  
Гортипография Одесского управления по печати,  
цех №3. Ленина 49

447280

AB 34.911

**AB 34.911**