

*Н.Н. Хонелия, канд. техн. наук, доцент,
Н.Б. Долинская, аспирантка
Одесский национальный морской университет*

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОСНОВАНИЙ ПОРТОВЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Наведені результати досліджень на основі методу розрахунку, який установлює вплив переміщень споруди і дограничних характеристик ґрунту на несучу здатність основи.

New research results based on the calculation method, taking into account influence of structure movements and sublimity characteristics of the soil upon foundation blaring capacity, are presented.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными практическими задачами. При проектировании оснований портовых гидротехнических сооружений следует учитывать такой фактор, как недопустимость превышения предельных деформаций, назначаемых по условиям нормальной эксплуатации. Достижение предельного состояния грунта, т.е. когда возникает локальное его разрушение в некоторой точке или небольшой области основания, означает, что здесь грунт имеет пониженное сопротивление сдвигу, но сооружение в целом еще не находится в опасном положении. Однако полное разрушение основания может произойти при распространении предельного состояния на значительную область основания.

Анализ последних исследований и публикаций, в которых положено начало решению данной проблемы. Изучению вопроса развития областей предельного состояния грунта, определению предельной нагрузки, вызывающей образование этих областей под подошвой фундамента сооружения, и влиянию этих факторов на работу системы «основание – сооружение» посвящен ряд известных работ [1 – 3].

Выделение ранее не решенных частей общей проблемы, которым посвящена данная статья. Следует отметить, что несущая способность основания определялась без учета трения по контакту фундамента и грунтового основания, а также без учета деформированного состояния сооружений, что приводит к завышению коэффициентов запаса устойчивости и несущей способности.

Несущая способность должна рассматриваться как результат перехода системы «грунтовое основание – сооружение» в предельное состояние с учетом характера и направления перемещения сооружения.

Цель работы. Эту задачу можно решить путем разработки математической модели напряженно-деформированного состояния

системы «сооружение – основание» на основе применения современных методов оценки предельных состояний, в рамках теории смешанного напряженного состояния и учета перемещений и деформаций сооружения.

Напряженное состояние грунтового основания, взаимодействующего с подошвой сооружения, является в общем случае смешанным, когда на части контактной зоны грунта основания с сооружением реализуется предельное, а на другой части – допредельное состояние.

Изложение основного материала исследования. Рассматриваются некоторые результаты исследований системы «сооружение – основание». Разработана методика расчета несущей способности оснований, которая базируется на теории предельного напряженного состояния, но отличается от других приближенных методов тем, что учитывает наличие в основании сооружения двух зон напряженного состояния грунта (предельного и допредельного). Главной отличительной особенностью рассматриваемого метода является учет трения по контакту жесткого фундамента сооружения и грунтового основания, а также влияние допредельного поведения грунта основания на его несущую способность.

Рассматривается модель взаимодействия портового гидротехнического сооружения в виде жесткой подпорной стенки с грунтовым основанием, которая базируется на следующих основных предпосылках:

1. Грунтовое основание, взаимодействующее с подошвой сооружения, включает зоны предельного и допредельного напряженного состояния.

2. Любое по величине и направлению смещение сооружения вызывает во взаимодействующем с ним основании развитие зон предельного напряженного состояния, объем и ширина зоны контакта с подошвой сооружения которых увеличиваются по мере роста смещений.

3. Граница зон предельного и допредельного напряженного состояния грунта основания (или, что то же, ширина b_e зоны контакта грунта, находящегося в предельном напряженном состоянии) определяется отношением (см. рис. 1)

$$b_e = \frac{E(u, q) - 0.5 \cdot B \cdot (f' + f_{np}^{mp})}{2 \cdot (f_{np}^{mp} - f')}, \quad (1)$$

где b_e – ширина зоны контакта грунта основания с подошвой сооружения, находящегося в предельном напряженном состоянии; B – ширина подошвы сооружения, взаимодействующая с грунтом основания; f_{np}^{mp} – интенсивность сил трения по контакту подошвы сооружения и грунтового основания, соответствующее состоянию предельного равновесия; f' – интенсивность сил трения по контакту подошвы сооружения и грунтового основания, соответствующее состоянию допредельного равновесия.

Здесь E – равнодействующая бокового давления грунта на сооружение, зависящая от смещения сооружения u и равномерно распределенной нагрузки интенсивностью q . Ее значение определяется для каждого текущего

деформированного состояния сооружения как векторная сумма двух ее составляющих: предельной E_e и допредельной E' , – по рекомендациям работ [4, 5], в соответствии с выражением $E = [E_e^2 + E'^2 + 2 \cdot E_e \cdot E' \cdot \cos(\delta_e - \delta')]^{1/2}$.

4. Согласно СНиП 2.02.02-85 [6] трапецидальную эпюру с ординатами σ_{\max} и σ_{\min} целесообразно заменить расчетной равномерной эпюрой шириной B и давлением σ . По рекомендации Н.М. Герсеванова, такая замена осуществляется, исходя из двух положений:

- трапецидальная и расчетная эпюры должны быть равновеликими;
- центры тяжести обеих эпюр располагаются на одной вертикали.

Используя эти условия, можно получить выражения:

$$B = \frac{2 \cdot b \cdot (\sigma_{\max} + 2 \cdot \sigma_{\min})}{3 \cdot (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})}; \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{b \cdot (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})}{2 \cdot B}. \quad (3)$$

При осуществлении такой замены линии действия вертикальных составляющих G_e и G' равнодействующих N_e и N' на уровне подошвы сооружения остаются неизменными. В пределах ширины b_e составляющая G_e и равнодействующая N_e соответствуют силам, действующим в пределах ширины b_e зоны предельного напряженного состояния, а составляющая G' и равнодействующая N' соответствуют силам, действующим в пределах ширины $B - b_e$ зоны допредельного напряженного состояния (см. рис. 1).

5. Углы отклонения составляющих N_e и N' равнодействующей несущей способности N и равнодействующих реактивного давления (см. рис. 2, 3) массива грунта по поверхности скольжения от нормали к границе этой поверхности принимаются равными: для зоны предельного напряженного состояния шириной b_e соответственно δ_e и φ_e ; для зоны допредельного напряженного состояния шириной $B - b_e$ соответственно δ' и φ' , причем угол φ' определяется в соответствии с выражением [5] $\varphi' = \varphi_0 + n(\varphi - \varphi_0)$. Углы δ' и δ_e можно определить по формулам: $\operatorname{tg} \delta' = E' / G'$, $\operatorname{tg} \delta_e = E_e / G_e$, где E_e, G_e и E', G' – горизонтальные и вертикальные составляющие равнодействующих N_e и N' соответственно в пределах зон предельного и допредельного напряженного состояния; n – параметр, зависящий от соотношения размеров зон предельного и допредельного напряженных состояний грунта основания ($0 \leq n \leq 1$) и определяемый отношением $n = V_e / V$, где V_e и V – соответственно объемы призмы грунта, находящейся в предельном состоянии, и всего грунта, взаимодействующего с подошвой сооружения, определяемые из геометрических соображений; φ_0 – значение угла, соответствующее состоянию покоя (сооружение неподвижно), который может быть принят, по рекомендации работы [7], $\varphi_0 = \arcsin \frac{\sin \varphi}{2 - \sin \varphi}$.

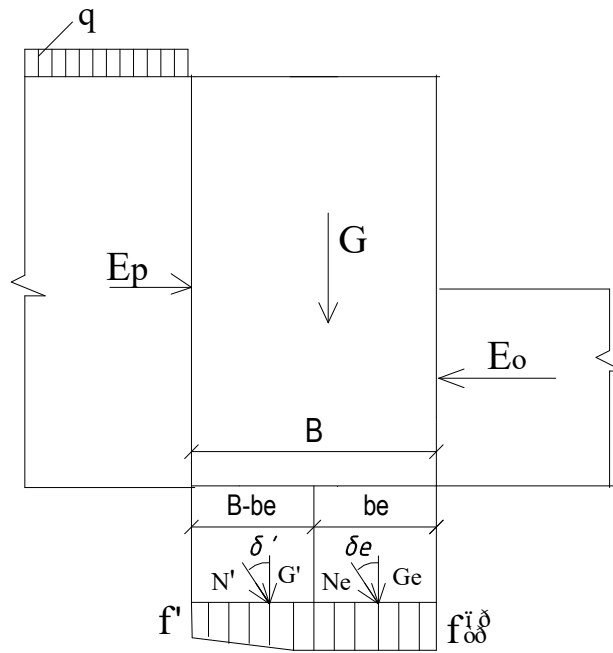


Рис. 1. – Расчетная схема к определению зон предельного и допредельного напряженного состояния грунта основания

6. Равнодействующая N может быть определена для каждого текущего деформированного состояния сооружения как векторная сумма двух ее составляющих: предельной N_e , действующей на участке b_e , и допредельной N' , действующей на участке шириной $B - b_e$, в соответствии с выражением

$$N = \left[N_e^2 + N'^2 + 2 \cdot N_e \cdot N' \cdot \cos(\delta_e - \delta') \right]^{1/2}. \quad (4)$$

7. Связность грунта, характеризуемую удельным сцеплением c , можно учесть, приложив на поверхности грунта в пределах зоны предельного напряженного состояния фиктивную равномерно распределенную нагрузку (давление связности) интенсивностью $n_e = c / \operatorname{tg} \varphi_e$, в пределах зоны допредельного напряженного состояния – интенсивностью $n' = c / \operatorname{tg} \varphi'$ (рис. 2, 3).

Равнодействующие указанной равномерно распределенной нагрузки в первом случае G_{ce} , а во втором – G'_c (рис. 2, 3). При этом необходимо принимать во внимание приращение давления связности Δn на границе зон предельного и допредельного напряженного состояния, определяемое по формуле $\Delta n = c \cdot \operatorname{ctg}(\varphi' - \varphi_e)$. При подсчете сил G'_1, G'_2 и G'_3 следует учитывать равнодействующие нагрузок $G_{\Delta c1} = \Delta n \cdot AB$, $G_{\Delta c2} = \Delta n \cdot B_0 C_0$ и $G_{\Delta c3} = \Delta n \cdot CD$ на границе зон предельного и допредельного напряженного состояния. При подсчете сил G'_3 и G'_{3e} , кроме веса грунта в объеме зон ECD (G'_{3e}) и $C_0 DD' C'$ (G'_3), в них следует учитывать равнодействующие нагрузок интенсивностью n_e и n' над зонами 3 и 3' ($G_{ce} = n_e \cdot ED$ и $G'_c = n' \cdot DD'$).

Основываясь на принятых предпосылках, получены расчетные формулы для вычисления несущей способности грунта основания N в зависимости от смещения стенки при смешанной постановке задачи.

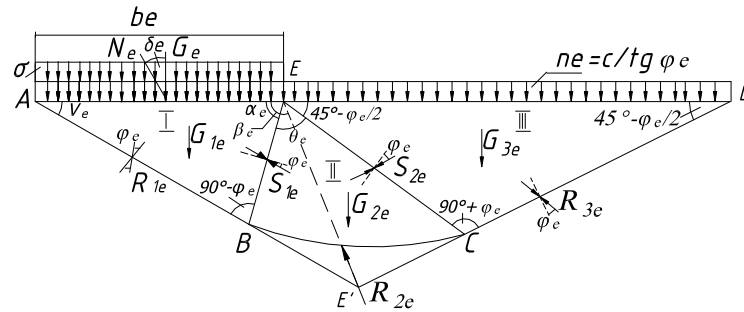


Рис. 2. – Объемлющая поверхность скольжения и очертания зон предельного напряженного состояния грунта основания

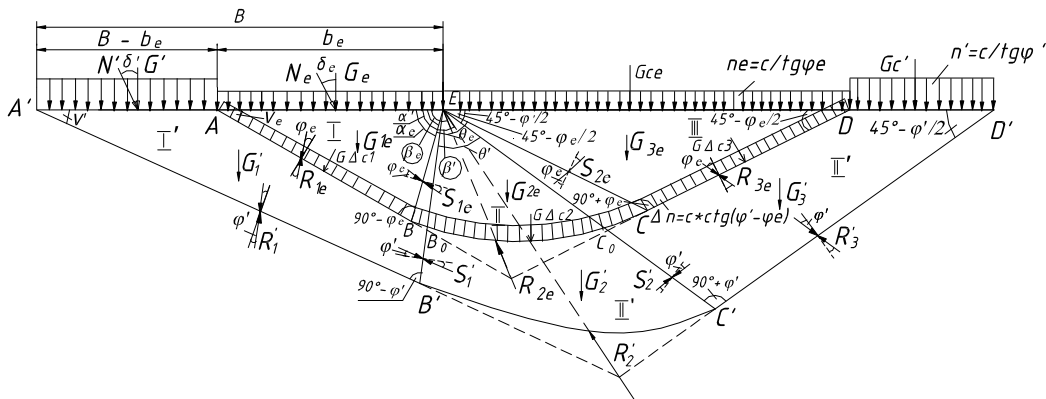


Рис. 3. – Объемлющая поверхность скольжения и очертания зон допредельного напряженного состояния грунта основания

Общая схема получения искомого решения базируется на последовательном рассмотрении условий равновесия предельной и допредельной зон напряженного состояния грунта основания, взаимодействующего с подошвой сооружения для его произвольного промежуточного деформированного состояния.

Одним из основных факторов, учитываемых при анализе фактической схемы работы подпорных стенок, являются эксплуатационные нагрузки, влияющие на безопасность и долговечность сооружений.

В этой связи целесообразно применить разработанный метод для исследований подпорных стенок, возводимых способом «стена в грунте» и установить влияние учета трения по контакту жесткого фундамента сооружения и грунтового основания, допредельных характеристик грунта, а также влияние деформированного состояния рассматриваемых сооружений на схему распределения допускаемых эксплуатационных нагрузок в зависимости от фактической несущей способности грунтового основания.

В настоящее время устройство несущих конструкций способом «стена в грунте» получает все большее распространение. Особенно перспективно внедрение этого способа в практику строительства при применении современного специализированного оборудования. В последние годы такие конструкции находят большое распространение на объектах морского строительства. Рассматривалось два варианта расчетов. В первом варианте несущая способность основания рассчитывалась традиционным методом (без учета деформированного состояния сооружения и трения по контакту подошвы стенки и грунтового основания) [8], а во втором – по предлагаемому методу.

Взаимодействие рассматриваемых сооружений с грунтовым основанием исследовалось на примере однородного основания со следующими характеристиками грунта: удельный вес грунта $\gamma=9,0 \text{ Кн/м}^3$; параметры прочности $C = 15,0 \text{ Кн/м}^2$; $\varphi = 26^\circ$. В качестве примера рассчитывалась подпорная стенка шириной 2,0 м.

Результаты исследований представлены на рис. 4 в виде графиков зависимостей допускаемых эксплуатационных нагрузок от возможных для рассматриваемого сооружения перемещений.

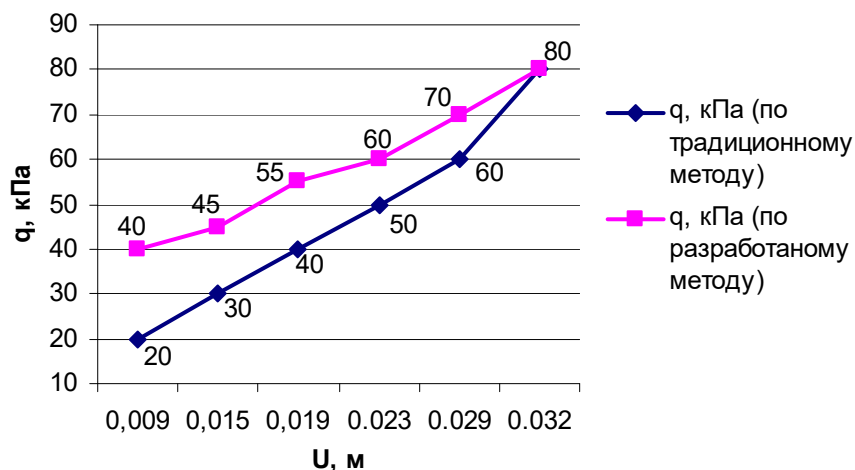


Рис. 4. – Графики зависимостей «эксплуатационная нагрузка q , кПа – перемещение сооружения U , м»

Графики рис. 4 иллюстрируют влияние перемещений сооружения на величину допускаемой эксплуатационной нагрузки. Как показывают результаты расчетов, разработанный метод позволяет увеличить интенсивность допускаемых эксплуатационных нагрузок на 10 – 20 кПа от значений, полученных по традиционному методу.

Зависимость несущей способности основания от перемещений сооружения по результатам исследований показана на рис. 5 в виде графиков зависимостей «несущая способность основания N , кПа – перемещение сооружения U , м». Перемещения сооружения изменялись во всем диапазоне от давления грунта за стенкой в состоянии покоя (сооружение неподвижно) до предельного (активного) давления.

Как показывают графики рис. 5, несущая способность, определяемая по разработанному методу, значительно отличается от традиционного метода. В интервале перемещений стенки от 0,009 до 0,029 м несущая способность, полученная по разработанному методу, выше по сравнению с традиционным методом расчета примерно в 1,4 – 1,1 раза. Это свидетельствует о том, что учет перемещений при оценке несущей способности грунта основания дает «запас», в отличие от традиционного метода, который этот запас не гарантирует.

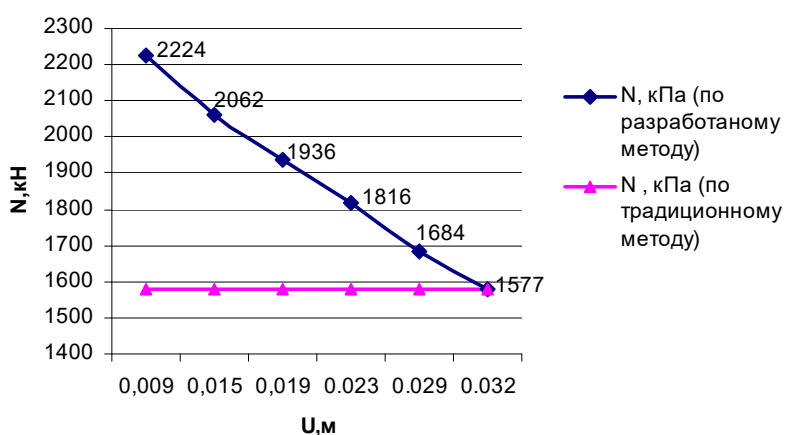


Рис. 5. Графики зависимостей «несущая способность основания N , кН – перемещение сооружения U , м»

Согласно полученным результатам, можно отметить целесообразность применения разработанного метода, учитывающего деформированное состояние подпорных стен при оценке несущей способности оснований и определении схемы допускаемых эксплуатационных нагрузок.

Выводы. Можно заключить, что применение приведенной выше методики учета деформированного состояния сооружений при оценке несущей способности основания для эксплуатируемых объектов, включающих в свой состав жесткие подпорные стенки, обеспечит их

правильную бесперебойную работу на всем протяжении срока службы, а также уточнит объемы, сроки и способы необходимой реконструкции.

Литература

1. Гольдштейн Л.М. О приближенном решении задачи пространственного предельного равновесия грунта/ Л.М. Гольдштейн // *Основания, фундаменты и механика грунтов.* – 1969. – № 5. – С. 12 – 15.
2. Малышев М.В. Развитие областей предельного состояния грунта в основании квадратного штампа / М.В. Малышев, А.С. Савенков, С.А. Елизаров // *Основания, фундаменты и механика грунтов.* – 1991. – № 2. – С. 15 – 17.
3. Яковлев П.И. О некоторых результатах экспериментальных исследований взаимодействия гидротехнических сооружений с грунтом / П.И. Яковлев // *Межвузовский сборник: гидротехнические сооружения.* – Владивосток, 1987. – С. 134 – 140.
4. Дубровский М.П. Определение силы бокового давления связного грунта на подпорные стенки при смешанном напряженном состоянии / М.П. Дубровский, Н.Н. Хонелия // *Известия вузов. Строительство.* – 1997. – № 3. – С. 27 – 31.
5. Хонелия Н.Н. Усовершенствованные методы расчета портовых гидротехнических сооружений для правильной оценки фактической несущей способности грунтовых оснований / Н.Н. Хонелия // *Вестник Одесского государственного морского университета.* – Одесса: ОДМУ, 2001. – № 7. – С. 141 – 153.
6. СНиП 2.02.02-85. *Основания гидротехнических сооружений.*
7. Омельченко Ю.М. Портовые гидротехнические сооружения, эксплуатируемые в экстремальных условиях / Ю.М. Омельченко, М.П. Дубровский, М.Б. Пойзнер. – М.: ВНИИОЭНГ, 1991. – 194 с.
8. Яковлев П.И. *Несущая способность оснований портовых гидротехнических сооружений/ П.И. Яковлев.* – М.: Транспорт, 1978. – 207 с.