

УДК 627.33:624.046

М.П. Дубровский, Н.Н. Хонелия, Н.В. Кострец

**К ОЦЕНКЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ  
«ПРИЧАЛЬНОЕ СООРУЖЕНИЕ-ГРУНТОВАЯ СРЕДА»**

*Рассмотрены результаты исследований на основе расчетной модели, которая устанавливает влияние допредельных характеристик грунта на отпорную способность оснований.*

**Ключевые слова:** боковое давление, предельное и допредельное напряженное состояние, грунтовая среда, несущая способность.

*Розглянуто результати досліджень на основі розрахункової моделі, яка встановлює вплив дограничних характеристик ґрунту на відпорну здатність основ.*

**Ключові слова:** бічний тиск, граничний та дограничний напружений стан, ґрунтова середовище, несуча здатність.

*Results of researches based on the new calculation model are presented. The model determines influence of soil sublimit characteristics on reactive capacity of the soil foundations.*

**Keywords:** lateral pressure, bearing capacity, sublimit and limit stressed state, soil media.

**Постановка проблемы.** Правильная оценка надежности грунтовых оснований является одним из главных факторов при проектировании и в дальнейшем при строительстве причальных гравитационных сооружений. Повышение надежности оснований причальных сооружений зависит от создания усовершенствованных методов расчета их отпорной (несущей) способности, позволяющих с необходимой степенью точности отразить реальные условия взаимодействия рассматриваемых сооружений с грунтовой средой.

В настоящее время методы расчета оснований, которые применяются при проектировании причальных сооружений гравитационного типа, например изложенные в работах [1, 2], не учитывают в грунтовой основе, взаимодействующем с подошвой сооружения, наличие и трансформацию зон предельного и допредельного напряженного состояния.

Предложение об учете допредельных характеристик грунта основания, оказывающих существенное влияние на величину отпорной способности, было сделано Ю.К. Зарецким [3] на основе выполненных экспериментальных исследований.

Таким образом, современный уровень оценки работы причальных сооружений гравитационного типа связан с разработкой методов расчета [4, 5], которые позволяют определить отпорную способность оснований в рамках модели смешанного напряженного состояния под подошвой сооружения и вокруг нее.

---

© Дубровский М.П., Хонелия Н.Н., Кострец Н.В., 2013

Следует отметить, что важнейшим фактором, который влияет на оценку отпорной способности грунтовых оснований причальных сооружений гравитационного типа и во многом определяет характер работы системы «сооружение-основание», являются величина и характер нагрузок, действующих на сооружение, в том числе и нагрузка от бокового давления грунта.

**Цель работы.** Для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «причалное сооружение гравитационного типа – грунтовая среда» с учетом особенностей работы сооружения и грунтовой засыпки выполнено численное моделирование рассматриваемой системы в широком диапазоне нагрузок от бокового давления грунта засыпки.

**Изложение основного материала.** Для рассматриваемых сооружений характерны два этапа взаимодействия с грунтовой засыпкой: этап возведения, включающий устройство обратной засыпки, и этап эксплуатации, при котором на сооружение воздействует эксплуатационная нагрузка  $q$ .

Схема причального сооружения гравитационного типа, взаимодействующего с грунтовой засыпкой, для этапа его эксплуатации показана на рис. 1.

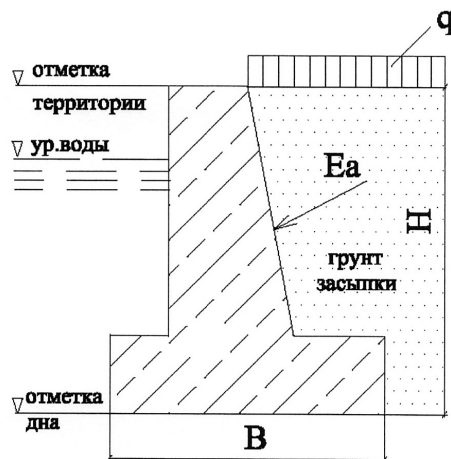


Рис. 1. Схема причального сооружения гравитационного типа:  
 $H$  – высота сооружения;  $B$  – ширина подошвы сооружения;  
 $E_a$  – активное давление грунта засыпки;  $q$  – эксплуатационная  
равномерно-распределенная нагрузка

На первом этапе возведения сооружения распорное боковое давление от действия обратной засыпки уменьшается от начального (максимального) значения, соответствующего давлению покоя  $E_0$  до минимального значения, соответствующего активному давлению  $E_a$  (рис. 2). Распорное давление обратной засыпки обусловлено действием ее собственного веса при отсутствии поверхностной эксплуатационной нагрузки  $q$ .

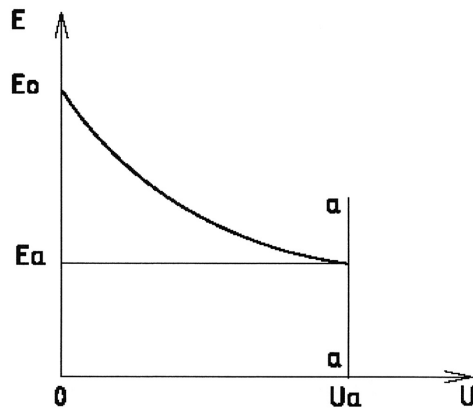


Рис. 2. Зависимость распорного бокового давления грунта засыпки  $E$  от смещения сооружения  $U$  на этапе его возведения:  
 $a$ – $a$  граница достижения активного давления грунта  $E_a$

В работе рассматривается второй этап взаимодействия сооружения с грунтовой засыпкой (этап эксплуатации), при котором по мере приложения и увеличения интенсивности равномерно-распределенной нагрузки  $q$  значения активного давления грунта засыпки будут увеличиваться от  $E_a$  до  $E_{np}$  (рис. 3); соответственно будет происходить мобилизация отпорной способности основания под подошвой сооружения и вокруг нее. Здесь  $E_{np}$  – величина активного давления, соответствующая предельной равномерно-распределенной нагрузке  $q_{np}$ , превышение которой приводит к потере устойчивости подпорной стенки.

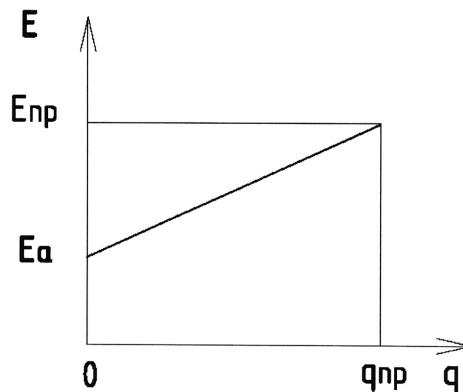


Рис. 3. Зависимость бокового давления грунта засыпки  $E$  от интенсивности равномерно-распределенной нагрузки  $q$

Следует отметить, что в эксплуатационной стадии начальным состоянием системы «сооружение-грунтовая среда» считается отсутствие поверхностной эксплуатационной нагрузки  $q$ , когда на подпорную стенку действует только активное (т.е. минимальное распорное) давление  $Ea$  обратной засыпки позади тыловой контактной грани стенки. В этом состоянии устойчивость сооружения обеспечивается балансом сдвигающих (от активного давления  $Ea$ ) и удерживающих (за счет реактивного сопротивления грунтового основания, находящегося в допредельном напряженном состоянии) сил.

По мере приложения и увеличения эксплуатационной нагрузки  $q$  будут расти как сдвигающие силы (за счет увеличения значения активного давления  $Ea$ ), так и реакция основания (за счет появления и развития в нем зон предельного напряженного состояния). Этот процесс может продолжаться до достижения в грунтовом основании сооружения предельной несущей способности (когда весь грунт, взаимодействующий с подошвой сооружения, переходит в предельное напряженное состояние). Дальнейший рост внешней нагрузки может привести к потере устойчивости подпорной стенки вследствие исчерпания несущей способности грунтового основания.

Рост равномерно-распределенной нагрузки  $q$  приводит к увеличению активного давления грунта засыпки. Этот процесс сопровождается трансформацией областей предельного и допредельного напряженных состояний грунта основания, при которой увеличиваются размеры первых и сокращаются размеры вторых. На рис. 4 показан пример трансформации рассматриваемых зон по мере увеличения нагрузки  $q$ .

При трансформации зон предельного напряженного состояния грунта основания 1, 2, 3 и 4, которые проходят через точки контактной грани подошвы сооружения (соответственно по ширине  $b_{1e}$ ,  $b_{2e}$ ,  $b_{3e}$  и  $b_{4e}$ ), их границы опускаются вниз, оставаясь параллельными вследствие постоянства угла  $\varphi_e$ . Границы зон предельного напряженного состояния грунта основания 1, 2, 3 и 4 в области выпора, расположенной за подошвой сооружения, опускаются вниз, оставаясь параллельными вследствие постоянства угла  $45^\circ - \varphi_e/2$ . Границы зон предельного напряженного состояния грунта основания 1, 2, 3 и 4 в промежуточной области (зона Прандтля), очерчиваемой по логарифмической спирали, опускаются вниз вследствие постоянства угла  $\theta_e$ , где  $\theta_e$  – угол раствора логарифмической спирали рассматриваемой области.

Одновременно с этим, границы зон допредельного напряженного состояния 1', 2', 3' и 4' под подошвой сооружения изменяют наклон к горизонту от угла  $\vartheta_1'$  до значений  $\vartheta_2'$ ,  $\vartheta_3'$  и  $\vartheta_4'$  по мере увеличения активного давления в интервале значений от  $Ea$  до  $Enp$ .

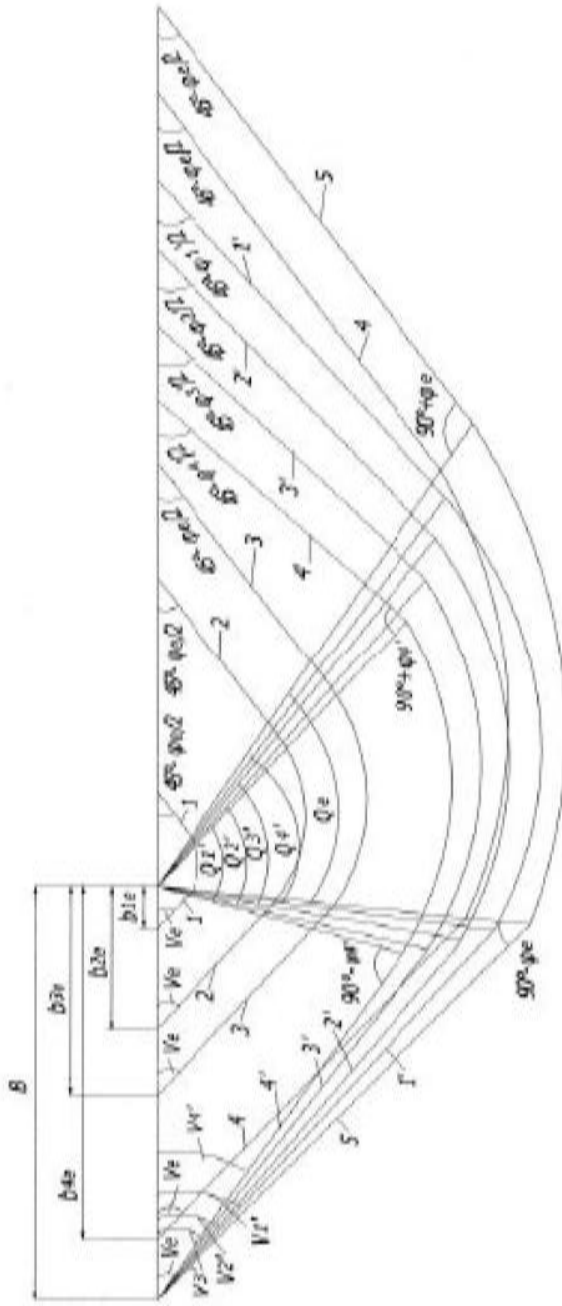


Рис. 4. Трансформація зон передельного та допередельного напружених составній ґрунта освоенія.  
 I' – границя допередельного напружених составній ґрунта освоенія при акціоновом  
 давленні I, которое приводит к формированию зоны передельного напружених составній ґрунта  
 2, 2'; 3, 3'; 4, 4' – границы зон передельного и допередельного напружених составній ґрунта  
 освоенія по мере роста эксплуатационной нагрузки q; 5 – граница приделе при достижении  
 передельной оппорной способности ґрунта освоенія

Границы зон допредельного напряженного состояния 1', 2', 3' и 4' в области выпора, расположенной за подошвой сооружения, изменяют наклон к горизонту от угла  $45^\circ - \varphi_1'/2$  до значений  $45^\circ - \varphi_2'/2$ ,  $45^\circ - \varphi_3'/2$  и  $45^\circ - \varphi_4'/2$  в соответствии с рассмотренным интервалом значений активного давления. Границы зон допредельного напряженного состояния 1', 2', 3' и 4' в промежуточной области, очерчиваемой по логарифмической спирали, изменяют угол от значения  $\theta_1'$  до значений  $\theta_2'$ ,  $\theta_3'$  и  $\theta_4'$ .

Применение предложенной модели для оценки влияния активного давления грунта  $Ea$  на трансформацию рассматриваемых зон напряженного состояния грунта основания в интервале нагрузок  $[0; qnp]$  позволило определить характер поверхностей скольжения и размеров допредельных зон напряженного состояния в начальной стадии формирования предельных зон. Как показано на рис. 5, рост равномерно-распределенной нагрузки  $q$  в рассматриваемом интервале  $[0; qnp]$  в момент формирования зон предельного напряженного состояния сокращает размеры зон допредельного напряженного состояния (1', 2', 3', 4') и изменяет очертание границ поверхностей скольжения. Такой процесс продолжается до тех пор, пока ширина зоны предельного напряженного состояния под подошвой сооружения не достигнет величины  $be = B$ .

На основе разработанной расчетной модели выполнены исследования системы «причальное сооружение - основание» в интервале эксплуатационных нагрузок  $[0; qnp]$  и соответствующих значений активного давления грунта засыпки  $[Ea; Enp]$ , некоторые качественные результаты которых показаны на рис. 6.

Зависимости отпорной способности грунтового основания, представленные на рис. 6, показывают, что в промежутках между крайними значениями давлений  $Ea$  и  $Enp$ :

- предельная составляющая отпорной способности основания  $N_e$  возрастает от нуля при активном давлении грунта за стенкой сооружения  $Ea$  до отпорной способности  $Nnp$ , соответствующей некоторой величине активного давления  $Enp$ , которая соответствует величине  $qnp$ ;

- допредельная составляющая отпорной способности основания  $N'$  уменьшается от отпорной способности  $Na$ , соответствующей активному давлению грунта  $Ea$  до нуля;

- результирующая отпорная способность грунта основания  $N$ , равная векторной сумме предельной и допредельной составляющих, увеличивается от отпорной способности  $Na$ , соответствующей активному давлению грунта за стенкой  $Ea$ , до отпорной способности, соответствующей величине давления  $Enp$ , при которой объем зоны предельного напряженного состояния грунта основания максимален.

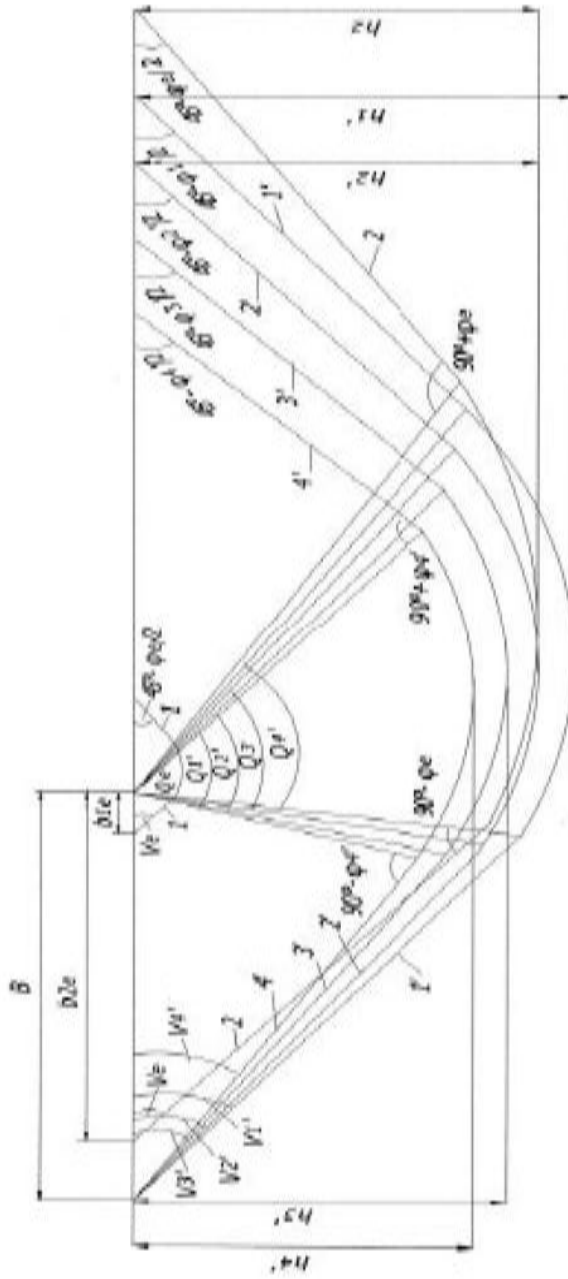


Рис. 5. Трансформативна зона допредельного напруженого стану трунтя основанія с ростом равномерно-распределенной нагрузки  $q$ : 1' – граница зоны допредельного напруженого стану трунтя основанія в начальной стадии образования границы зоны предельного напруженого стану; 2'; 3'; 4' – границы зон допредельного напруженого стану трунтя основанія по мере роста эксплуатационной нагрузки  $q$ ; 2 – зона предельного напруженого стану трунтя основанія при  $be \rightarrow B$

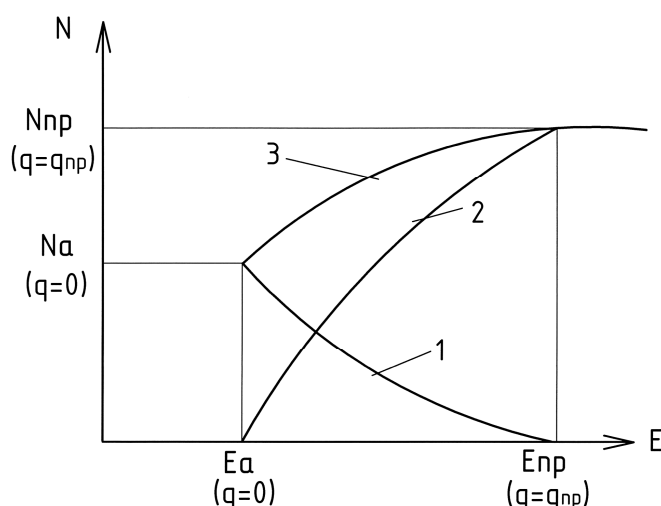


Рис. 6. Зависимости отпорной способности грунтового основания в интервале давлений грунта засыпки  $[E_a; E_{пр}]$ :  
1 – допредельная составляющая отпорной способности грунта основания  $N'$ ; 2 – предельная составляющая отпорной способности грунта основания  $N_e$ ;  
3 – результирующая отпорная способность грунта основания  $N$

**Выводы.** Рассмотрена модель системы «причальное сооружение-грунтовая среда», применение которой позволяет получить величины отпорной способности грунтового основания в широком диапазоне нагрузок от бокового давления грунта для условий эксплуатации сооружения. Областью практического применения выполненных исследований может стать проектирование, строительство новых и усиление существующих причальных сооружений, а также анализ технического состояния эксплуатируемых сооружений, включающих в свой состав жесткие подпорные стенки.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Яковлев П.И. Несущая способность оснований портовых сооружений. – М.: Транспорт, 1978. – 207 с.
2. Малышев М.В., Савенков А.С., Елизаров С.А. Развитие областей предельного состояния грунта в основании квадратного штампа // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1991. – № 2. – С. 15-17.
3. Зарецкий Ю.К. О несущей способности песчаных оснований фундаментов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2006. – № 3. – С. 2-8.



4. Хонелия Н.Н. Исследование несущей способности оснований портовых гидротехнических сооружений // Вестник ОГАСА. – Одесса: Изд-во ОГАСА, 2011. – № 7. – С. 141-153.
5. Дубровский М.П., Хонелия Н.Н. Определение силы бокового давления связного грунта на подпорные стенки при смешанном напряженном состоянии // Известия Вузов. Строительство. – 1997. – № 3. – С. 27-31.
6. СНиП 2.02.02-85. Основания гидротехнических сооружений. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 46 с.

*Стаття надійшла до редакції 26.04.2013*

**Рецензент** – доктор технічних наук, професор, завідувачий лабораторією «Дослідження конструкцій гідротехнічних споруд» ЧорноморНДІпроект **М.Б. Пойзнер**