

УДК 629.5

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА НА ДЕРЖАЩУЮ СИЛУ СУДОВЫХ ЯКОРЕЙ

Костерина Софья Дмитриевна¹, аспирант

e-mail: kocter-c@mail.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В статье рассматривается замена традиционных натурных испытаний якорного оборудования численным моделированием, позволяющим снизить временные и материальные затраты. Представлена методика определения держащей силы судового якоря при его численном моделировании на различных типах грунтов. Предложена двухшаговая методика проведения виртуального эксперимента и выполнено тестовое моделирование для якоря повышенной держащей силы.

Ключевые слова: характеристики грунта, держащая сила, якорь, численное моделирование.

INFLUENCE OF THE SOIL CHARACTERISTICS ON THE HOLDING POWER OF SHIP ANCHORS

Sofia D. Kosterina¹, Doctoral Student

e-mail: kocter-c@mail.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article discusses the replacement of traditional full-scale tests of anchoring equipment with numerical modeling, which reduces time and material costs. A methodology for determining the holding power of a ship's anchor during its numerical modeling on various types of soil is presented. A two-step method for conducting a virtual experiment is proposed, and test modeling is performed for a high-holding-power anchor.

Keywords: soil characteristics, holding force, anchor, numerical modeling.

Традиционная методика обоснования характеристик удерживающей способности якорного оборудования и самого якоря базируется на «натурных испытаниях», позволяющих получить наиболее достоверные результаты. Она при этом сопряжена с высокими временными и материальными издержками.

В связи с этим значительный интерес представляет метод численного моделирования, выступающий в качестве альтернативы традиционному методу. Его применение может существенно сократить объем финальных натурных испытаний за счет предварительной «виртуальной обкатки».

В сравнении с «натурными испытаниями», где многие параметры (например, неоднородность грунта или траектория движения якоря) фиксируются по ходу процесса, а методика проведения исследования может быть скорректирована в зависимости от текущих значений параметров, в «численном моделировании» результаты получаются только после завершения расчёта и внесение изменений на промежуточных этапах не представляется возможным.

В численном эксперименте было принято моделирование в два шага:

Шаг 1 – перемещение якоря с заданной скоростью на протяжении около 3 с под действием силы тяжести. Данный шаг позволяет привести якорь в рабочее состояние, вне зависимости от внешней нагрузки

Шаг 2 – плавный рост внешней силы в течение 2-х с до величины гарантировано превышающей держащую силу якоря, при достижении которой он начинает перемещаться в грунте.

Численное моделирование выполнялось для сбалансированного якоря повышенной держащей силы (ПДСБ) массой 106,95 кг; которых состоит из трёх деталей: лапы, веретена и условной модели якорной скобы.

Его геометрия задавалась на основе 3Д моделей (рисунок 1), с назначенным материалом – сталь плотностью 7850 кг/м³, модулем Юнга 210 ГПа и коэффициентом Пуассона 0,3.

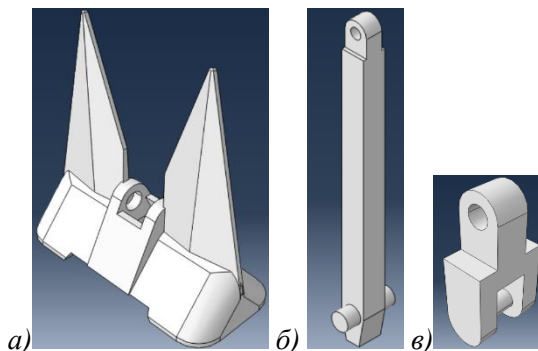


Рисунок 1 – Модели деталей якоря ПДСБ и Холла:
а – лапа ПДС, б – веретено, в – скоба

Коэффициент трения между поверхностью якоря и грунта составляет 0,58, а между деталями якоря 0,15. Скорость перемещения якоря на первом шаге принята равной 0,5 м/с, и несмотря на небольшое завышение – близка к реальным скоростям перемещения якорей. Это решение позволяет сократить время моделирования, размеры объема грунта и расчётной сетки.

Грунт моделируется в виде эйлеровой области размерами 1,6×1,2×5 м, 0,8 метра которой заполняется материалом.

Окончательный вид модели с якорем ПДС в процессе расчётов приведён на рисунке 2. На рисунке показана только заполненная грунтом область, а границы исключены.

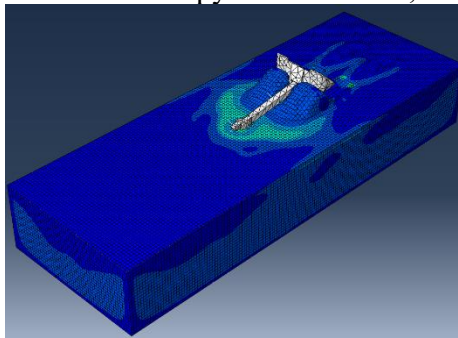


Рисунок 2 – Расчётная модель якоря ПДСБ

Общая характеристики моделируемых видов грунта приведены в таблице 1, где указываются: плотность грунта, модулем Юнга, коэффициентом Пуассона, углом трения, коэффициент когезии, углом дилатансии [1].

Таблица 1 – Выбранные значения характеристик грунта

Параметр	Песок	Ил	Мягкая глина	Щебень
Плотность (ρ), кг/м ³	1 900	1 700	1 800	2 000
Модуль Юнга (E), Па	50e6	10e6	20e6	100e6
Коэфф. Пуассона (ν)	0.3	0.3	0.45	0.15
Угол трения (ϕ), °	32	25	0	40
Коэффициент когезии Flow Stress Ratio (K)	1	1	0.8	1
Угол дилатансии (ψ), °	10	5	0	15
Yield Stress при 0 деф., Па	8 000	5 000	20 000	2 000

Угол дилатансии – это параметр в механике грунта и бетона, характеризующий изменение объема материала при сдвиговой деформации. Он показывает, насколько материал расширяется (увеличивается в объеме) при разрушении или сдвиге его внутренних частиц.

Коэффициент когезии – это прочность внутренних связей между одинаковыми частицами внутри одного материала. Он определяет способность вещества сопротивляться разрыву или сдвигу под воздействием внешних сил.

Коэффициент Пуассона – характеризует упругие свойства материала и показывает, насколько материал изменяет свои поперечные разрезы при растяжении или сжатии в продольном направлении.

Модуль Юнга показывает, насколько хорошо материал сопротивляется упругой деформации при растяжении или сжатии. Чем выше этот показатель, тем жёстче материал и тем больше усилий требуется приложить.

Для полного описание материала грунта также необходимо задаваться характеристиками упрочнения материала в виде диаграммы напряжения (σ) – деформации (ϵ) (таблица 2).

Таблица 2 – Диаграмма упрочнения грунта

Песок		Мягкая глина	
σ , Па	ϵ	σ , Па	ϵ
8 000	0	20 000	0
15 000	0,005	25 000	0,02
10 000	0,02	18 000	0,07
8 000	0,1	10 000	0,15
Ил		Щебень	

σ , Па	ε	σ , Па	ε
5 000	0	2 000	0
8 000	0,01	6 000	0,003
7 000	0,05	5 000	0,01
5 000	0,15	3 000	0,08

Так же при тестовых этапах моделирования было принято решения отказаться от использования симметрии в моделировании, из-за плохой сходимости расчёта и слабой согласованности деформаций грунта с физическими экспериментами, выполненными ранее [2].

Начало движение якоря в грунте в процессе увеличения внешней силы определяется по наличию резкого роста кинетической энергии системы. Зависимость кинетической энергии (КЕ) от времени моделирования приведено на рисунке 3.

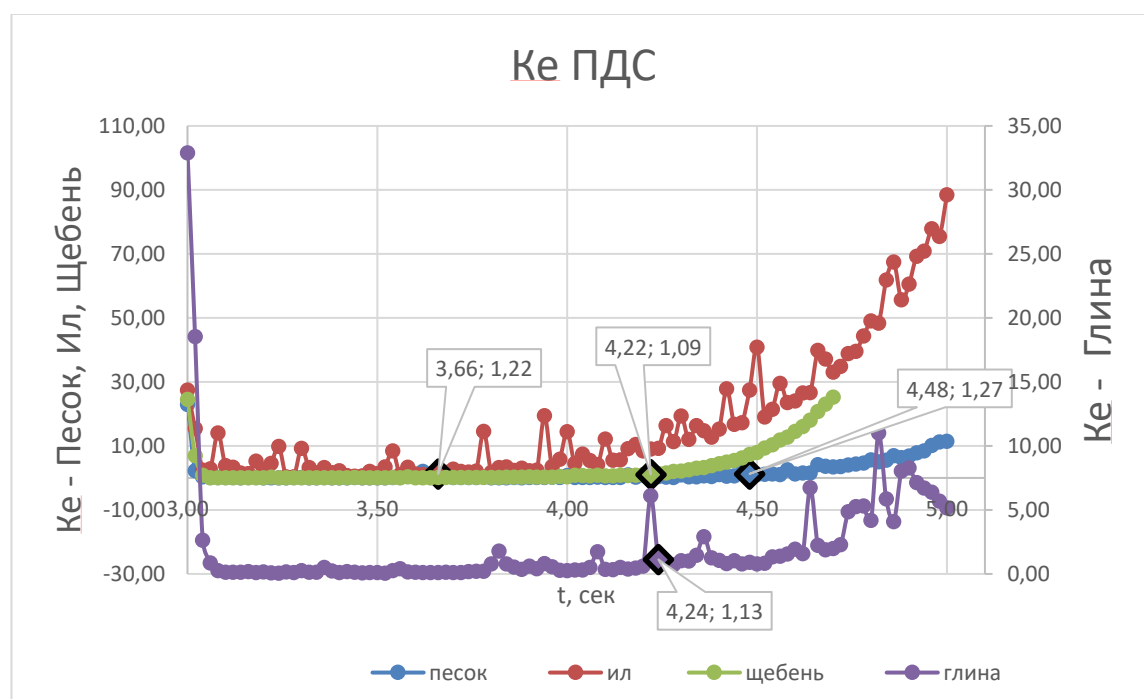


Рисунок 3 – Зависимость кинетической энергии от времени на различных типах грунта

Анализ рисунка показывает, что началом движения якоря под действием внешней силы на песке является 4,48 с, на иле 3,66 с, на щебне 4,22 с, на глине 4,24 с., что соответствует держащей силе 4752 Н, 2784 Н, 4128 Н, 4176 Н соответственно.

Полученные данные по распределению держащей силы согласуются с результатами, полученными компанией Virhop при натурном моделировании якорей подобного типа, что говорит об адекватности разработанной модели и алгоритма проведения расчётов. [3] Так выполненные компанией испытания в 1984 году показали значение удерживающей силы в 150 т на песке, 102 т в глине, 150 т в иле на скале. То есть соотношение держащей силы песок/глина/ил на скале – 1/0,68/1, а выполненном нами моделировании соответственно 1/0,87/0,59.

Полученные численным образом значения имеют существенное расхождение с натурным экспериментом, что можно объяснить следующими факторами: влиянием на конечный результат массы моделируемого якоря – 106 кг против 3 т и формы (нами использован якорь ПДС, в натурном эксперименте быстро зарывающийся якорь Stevpris для буровых установок). Несмотря на это соотношение уменьшение держащей силы на глине

по сравнению с песком нами подтверждено, а её отличие на иле так же объясняется тем, что натурный эксперимент проводился на иле ограниченной глубины, который находился поверх скальной породы.

Проведённые численные эксперименты показали зависимость держащей силы якоря от типа грунта и объяснимо коррелируются с полученными ранее натурными исследованиями. Это показывает работоспособность разрабатываемой методики и позволяет применять её для дальнейшего исследования якорей при различных их массово-геометрических характеристиках.

Список литературы:

1. Костерина С.Д. Численное моделирование судового якоря с грунтом / С.Д. Костерина, Ю.А. Кочнев // Судостроение. – 2026. – № 2(885). – С. 26-30.
2. Jurgen Grabe. Modeling the interaction between ship anchors and cables in Baltic Sea soils / Jurgen Grabe, Duy Anh Dao // Proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE), and 2nd Latin-American Regional Conference of the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) – 2024. – La Serena, Chile – 9 p.
3. Vryhof anchors: anchor manual 2010, the guide to anchoring – The Netherlands, 2010 – 45-54 p.

