

Теория корабля и строительная механика

Научная статья

УДК 629.12.001.2

DOI <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-1/11-19>

А.И. Мамонтов, М.А. Морев, К.А. Молоков, В.В. Новиков

МАМОНТОВ АНДРЕЙ ИГОРЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент,
Andrew.Mamontov@outlook.com [✉], <https://orcid.org/0000-0001-9350-9559>

МОРЕВ МАКСИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ – магистрант направления «Кораблестроение,
океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры», morev1@gmail.com

МОЛОКОВ КОНСТАНТИН АЛЕКСАНДРОВИЧ – кандидат технических наук, доцент Департа-
мента промышленной безопасности (доцент кафедры информационных технологий
и систем, *Владивостокский государственный университет*), spektrum011277@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-9764-9329>

НОВИКОВ ВАЛЕРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент Департамента мор-
ской техники и транспорта, leka230243@gmail.com

Политехнический институт

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

Определение параметров обводненного песка методом статического вдавливания индентора

Аннотация. На основании обработки результатов численного эксперимента получена формула пассивного давления грунта на поверхность клина при различных углах в его вершине. Показано расхождение численных значений и величин, полученных аналитически. Исходя из предложенной формулы определены параметры обводненного песка методом статического вдавливания индентора.

Ключевые слова: пассивное давление, линии скольжения, вдавливание в грунт

Для цитирования: Мамонтов А.И., Морев М.А., Молоков К.А., Новиков В.В. Определение параметров обводненного песка методом статического вдавливания индентора // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 1(54). С. 11–19.

Введение

При исследовании некоторых процессов есть необходимость в проведении моделирования процесса взаимодействия твердого острого клина и сыпучей среды. Подобная задача может возникать, например, при моделировании контакта корпуса днища судна с грунтом при выходе на необорудованный берег. Взаимодействие клина и грунта внутри общей модели является подмоделью, которая должна быть всесторонне исследована и упрощена до уровня простых алгебраических зависимостей при учете в ней наиболее существенно влияющих факторов. Только после этого следует переходить к изучению общей модели.

Для исследования взаимодействия клина и сыпучей среды нами проведен численный эксперимент. Получена формула, описывающая распределение давления на поверхность клина при вдавливании его в грунт. Она позволяет рассчитывать контактное давление в любой точке поверхности клина при вдавливании его в грунт без применения конечно-элементного моделирования.

Цель работы

Получить закон распределения давления вдоль наклонной плоскости, образующей вершину клина, вывести формулу с учетом геометрии клина и параметров грунта. Определить параметры обводненного песка методом статического вдавливания индентора на основании полученной формулы.

Постановка задачи

Формула давления грунта на поверхность клина необходима для моделирования взаимодействия днища корпуса судна с грунтом. Форма днища корпуса может быть приближенно задана формой клина [3]. Давление грунта определяется в результате анализа численных экспериментов моделирования взаимодействия клина с грунтом.

Клин представляет собой тело в виде штампа, вершину которого образуют две плоскости, установленные под некоторым углом, которым он вдавливается в грунт. Угол установки плоскостей меняется, придавая штампу более острую или тупую форму. При вдавливании область грунта под штампом переходит в пластическое состояние. Возникают линии скольжения и пластическое течение, в результате которого часть грунта из-под штампа выходит на поверхность. Более острый клин входит в грунт с меньшей силой, чем тупой.

Давление грунта распределяется по некоторому закону вдоль каждой плоскости и меняется в зависимости от угла установки плоскости [6]. Сцепление и угол внутреннего трения являются свойствами грунта, которые определяют пассивное давление на поверхность клина при вдавливании в грунт. Остальные параметры с некоторой степенью точности выражаются через эти два и приводятся в справочных данных по грунтам.

Клин, вдавливаемый в грунт (рис. 1), симметричен относительно диаметральной плоскости. Угол в вершине клина равен $2\cdot\beta$. Локальную ось, вдоль которой меняется давление, направим вдоль плоскости и обозначим x' (икс со штрихом). Размер клина в продольном направлении значительно больше, чем в двух других. Это позволяет выполнить расчеты в рамках плоской задачи механики твердого тела.

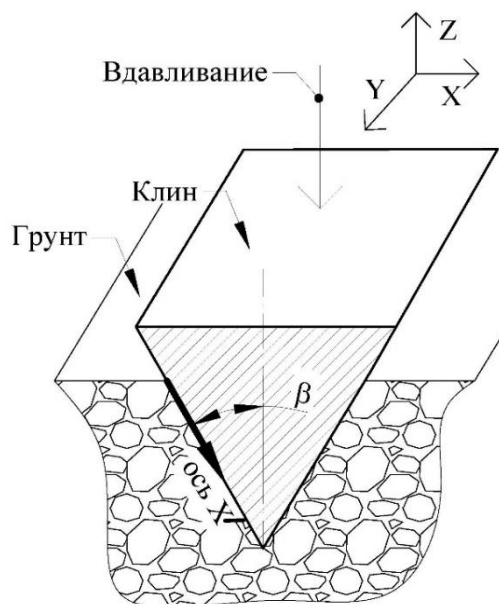


Рис. 1. Схема клина, вдавливаемого в грунт

При вдавливании индентора область грунта под штампом переходит в пластическое состояние. При этом возникают линии скольжения и пластическое течение, в результате которого часть грунта из-под штампа выходит на поверхность.

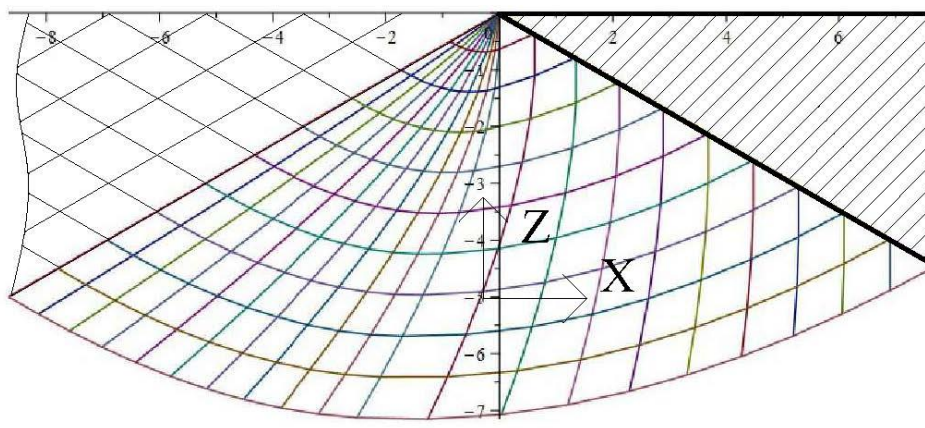


Рис. 2. Левая часть штампа и линии скольжения в грунте

Линии скольжения идентичны результатам численного решения системы уравнений сплошной среды. Точки их пересечения соответствуют числовым значениям координат и напряжений. Для примера проведем численный расчет, где свойства грунта принимаются согласно СНиП 2.02.01-83 «Основания зданий и сооружений». Исходные данные: угол внутреннего трения $\rho = 30^\circ$, сцепление $c = 30$ кПа, плотность $\gamma = 2$ т/м³ [8].

В результате расчета в узловых точках на поверхности штампа получены значения давления, их числовые значения представлены для $\beta = 30^\circ$ (рис. 3).

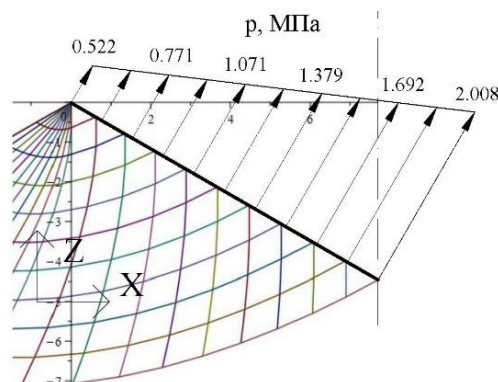


Рис. 3. Числовые значения давления в узловых точках

Давления на поверхности штампа почти линейно возрастают, что позволяет провести прямую линию по концам стрелок.

Был проведен ряд численных экспериментов по расчету давления. Выбирается фиксированный угол β , затем рассчитывается давление $p(x')$ в зависимости от координаты вдоль линии x' . Записывается зависимость $p(x')$. После этого угол β меняется и расчет повторяется. В результате получается ряд зависимостей $p(x')$.

По итогам ряда численных экспериментов и анализа результатов расчетов установлено, что пассивное давление грунта распределяется вдоль поверхности штампа в соответствии с законом, который можно представить выражением

$$p(x') = + \frac{1 + \sin(\rho)}{1 - \sin(\rho)} \cdot \left[c \cdot \cot(\rho) \cdot \exp(2 \cdot \beta \cdot \tan(\rho)) + \right. \\ \left. + x' \cdot \gamma \cdot (-1.5 \cdot \cos(2 \cdot \beta) + 2.5) \right] - c \cdot \cot(\rho), \quad (1)$$

где c , ρ и γ – сцепление, угол трения и плотность грунта соответственно; x' – координата вдоль плоскости клина. Начало отсчета на поверхности грунта. В процессе вдавливания увеличивается расстояние от поверхности до вершины индентора. Давление на вершину индентора растет, а у поверхности остается постоянным.

Формула содержит в квадратных скобках два слагаемых. Первое не зависит от веса среды, второе учитывает поправку на плотность. Если среда невесомая, то плотность равна нулю и решение сводится к хорошо известному результату для уравнений равновесия [5]. В этом случае эпюра давления не возрастает. Решение без учета веса подходит для пластичных сред, у которых сцепление c влияет на результат значительно больше, чем плотность γ .

В данном примере плотность оказывает существенное влияние на результат расчета. При учете веса среды сетка линий скольжения изменяется. Эпюра давления существенно возрастает с ростом координаты $x/$. Решения уравнений равновесия представлены на рис. 4 пунктиром. Рядом для сравнения сплошной линией приведены расчёты по формуле (1).

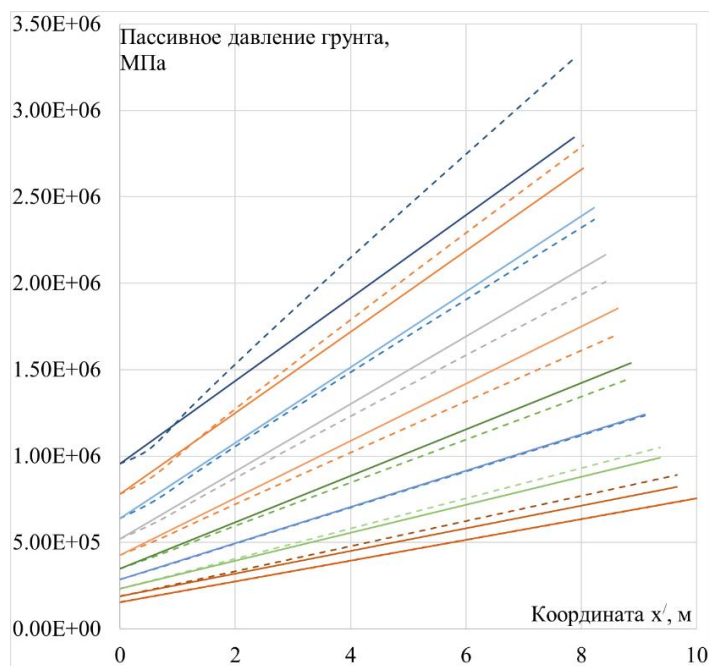


Рис. 4. Сопоставление результатов расчета пассивного давления грунта по формуле (1) и численно. Угол β варьирует в диапазоне от 0 до 90° с шагом 10°. Координата $x/$ принимается теоретически. В физическом эксперименте $x/$ меньше

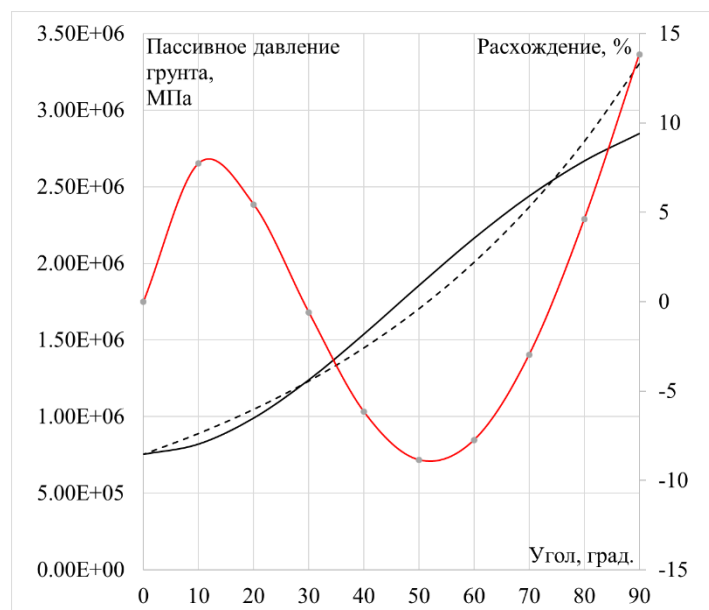


Рис. 5. Зависимости давления от угла в вершине штампа β по данным рис. 4 и расхождение численного и аналитического решений (обозначено красным цветом). Координата $x/$ принимается теоретически. В физическом эксперименте $x/$ меньше

Сопоставление пассивного давления грунта на поверхность штампа по формуле (1) и численно показывает, что наибольшее расхождение (верхняя пунктирная линия на рис. 4) получено для плоского штампа, когда угол $\beta = 90^\circ$, и равно 14%. Минимальное расхождение соответствует идеально острому штампу при $\beta = 0^\circ$.

На рис. 5 представлены зависимости давления от угла в вершине штампа β по данным рис. 4 в точках с максимальной координатой x' . Пунктиром отмечено численное решение, сплошной линией – решение по формуле (1).

Как показывает рис. 5, максимальное расхождение составляет 14% от численного, где угол β максимален, то есть вдавливание осуществляется полностью плоским штампом. В среднем расхождение численного и аналитического решений составляет 5%. Если расчет выполнить для средних точек эпюр (см. рис. 4), то среднее расхождение уменьшится до 2–3%.

Определение параметров обводненного песка методом статического вдавливания индентора

Для обеспечения безопасного взаимодействия судна с берегом необходимо определить параметры грунта и закономерности его пластического деформирования по ГОСТ 25100-20201. Для определения сцепления и угла внутреннего трения применяют метод кольцевого среза по ГОСТ 21719-802. В процессе выемки образцов свойства грунта могут меняться, поэтому определение параметров обводненных и крупнообломочных грунтов у уреза воды методом среза затруднительно [4, 5, 7].

Приведен способ определения параметров обводненного песка методом статического вдавливания индентора.

Одной из основных моделей сплошной среды, описывающих механическое поведение грунтов, является упругопластическая модель Кулона–Мора. В этой модели большинство свойств грунта, отвечающих за особенности пластического деформирования, формализуются через два параметра – сцепление и угол внутреннего трения. Чтобы определить эти два параметра, используется формула (1).

Индентор – внедряемое в поверхность тело, треугольный призматический клин, расстояние между торцами которого значительно больше глубины вдавливания. Давление грунта на индентор определяется в ходе эксперимента по весу груза, который приложен к индентору. Экспериментальные данные по полученным величинам давления сравниваются с давлением, рассчитанным с использованием зависимостей теоретической модели грунта.

Эксперимент представляет собой процесс вдавливания пяти клиньев с различными углами в вершине и соответственно различным весом (рис. 6). Клинья устанавливаются на поверхность обводненного песка. Замеряется глубина вдавливания по отметкам на поверхности, данные записываются. Далее на поверхность клина устанавливается груз, клин вдавливается в песок сильнее (рис. 7). Данные клина с весом и глубина вдавливания записываются. И так несколько раз. Получается зависимость «вес–глубина». Затем этот клин заменяется следующим, с другим углом в вершине.

Экспериментальное давление грунта на поверхность клина определяется по формуле

$$P = \frac{P}{2 \cdot \ell \cdot D \cdot \tan(\beta)},$$

где D – глубина вдавливания по нормали к поверхности;

$$D = x' \cdot \cos(\beta);$$

x' – глубина вдавливания по поверхности клина, определяется экспериментально;

P – приложенный вес для вдавливания индентора;

¹ ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация: введ. 1 января 2021 г.

URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293719/4293719820.pdf> (дата обращения: 01.11.2022).

² ГОСТ 21719-80. Грунты. Методы полевых испытаний на срез в скважинах и в массиве: введ. 23 мая 1980 г. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/454/45408.pdf> (дата обращения: 01.11.2022).

β – угол в вершине индентора, град. Применяются клинья с углами $\beta = 10,2; 25,1; 44,4; 59,04; 63,4^\circ$.



Рис. 6. Клинья перед вдавливанием с нанесенными метками



Рис. 7. Пример статического вдавливания клина

Теоретическое давление грунта на поверхность клина рассчитывается по формуле (1).

Зависимости экспериментального давления от глубины вдавливания для пяти углов обозначены на рис. 8 пунктирными линиями. Рядом сплошными линиями построены зависимости теоретического давления от глубины по формуле (1). Каждая пара соответствует фиксированному углу в вершине клина. Теоретические линии пересекают экспериментальные. Пересечение линий происходит в результате того, что давление грунта в эксперименте возрастает сильнее, чем в теории при увеличении глубины вдавливания.

Можно аппроксимировать эксперимент линейной зависимостью [2], но тогда будем учитывать закрытие пор в грунте и изменение его параметров, а такой цели нет. Цель – определить фиксированные усредненные параметры.

Выбор параметров грунта осуществлялся следующим образом. Принимается ряд значений угла внутреннего трения в диапазоне от 30 до 60° с шагом 5° . Для каждого угла выбирается такое сцепление, чтобы верхние и нижние сплошные линии совпадали с пунктирными. Для принятых значений также рассматривается совпадение средних линий. Если все пунктирные линии совпадают со сплошными, то выбор завершается.

Проанализировав формулу (1), можно показать, что для каждого фиксированного угла в вершине клина и фиксированного давления можно найти только одну пару значений сцепления и угла внутреннего трения, которая удовлетворяет всем значениям давлений и углам в вершине клина. Для примера представлены графики зависимости сцепления от угла внутреннего трения для трех различных углов в вершине клина и фиксированных давлений (рис. 9). Видно, что они пересекаются в одной точке, для которой $\rho = 37,5^\circ$ и сцепление $c = 2550$ МПа.

В конечном итоге параметры грунта для сплошных линий выбраны следующие: угол внутреннего трения $\rho = 37,5^\circ$; сцепление $c = 2550$ МПа. Плотность грунта принята как стандартная $- 2 \cdot 10^4$ Н/м³. Для выбранных параметров грунта совпадают все графики. Для других пар совпадают только верхние и нижние, а средние смещаются или выше, или ниже данных эксперимента.

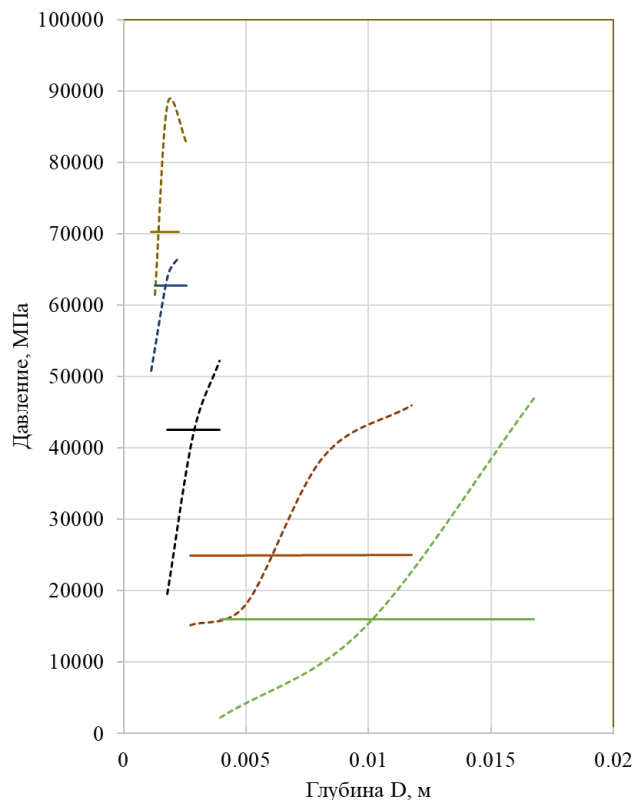


Рис. 8. Зависимости экспериментального и теоретического давления от глубины вдавливания для пяти углов

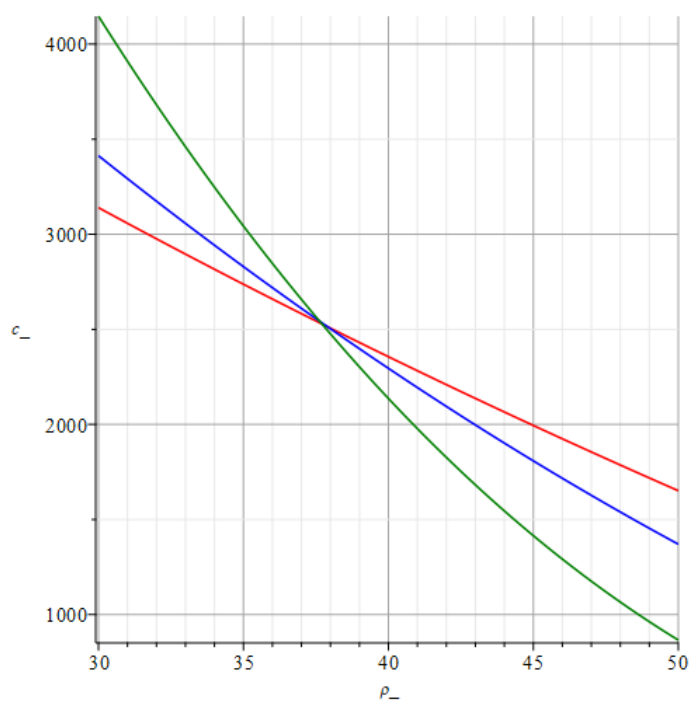


Рис. 9. Графики зависимости сцепления от угла внутреннего трения для трех различных углов в вершине клина и фиксированных давлений

Заключение

Применение предложенной формулы (1) позволяет существенно упростить модели общего уровня, в частности модель взаимодействия судна с грунтом. В этом случае давление представляет функцию, что позволяет исключить численный расчет и проанализировать основные закономерности изменения пассивного давления грунта в зависимости от формы корпуса и характеристик судна.

Для фиксированного угла давление складывается из постоянной части и возрастающей добавки, учитывающей плотность грунта. Характер возрастания добавки линейный. Давление возрастает в несколько раз на длине до 8 м. Это означает, что на практике, когда грунта касается не маленький штамп, а реальный корпус, необходим учет плотности среды. При меньших длинах можно ограничиться первым слагаемым.

Формула позволяет определить параметры грунта способом статического вдавливания индентора. Способ обладает положительными и отрицательными особенностями. Точность снижается из-за погрешности замеров глубины вдавливания и изменения свойств грунта в процессе внедрения клина и изменения свойств грунта в результате его уплотнения.

Из экспериментальных графиков следует, что давление возрастает при увеличении глубины вдавливания для одного и того же угла в вершине клина. Теоретически подсчитанное давление тоже возрастает при увеличении глубины вдавливания по формуле (1), что объясняется учетом плотности грунта. Но в эксперименте давление растет значительно быстрее. Поэтому теоретические линии почти горизонтальны по отношению к пунктирным (см. рис. 8).

Вероятно, при вдавливании клина происходит закрытие пор и уплотнение грунта. В результате уплотнения изменяются и пластические свойства. Для одного и того же угла в вершине индентора экспериментальное давление сильно возрастает при увеличении глубины вдавливания.

К положительным особенностям относится то обстоятельство, что средние теоретические линии (см. рис. 5) чувствительно реагируют на изменение угла внутреннего трения. При изменении угла от 50° до 60° теоретические данные смещаются и не попадают на данные экспериментов при фиксации верхних и нижних линий в пределах изменения пунктирных. Отклонение от результата, полученного таким способом, находится в пределах $\pm 5^\circ$ по углу внутреннего трения и ± 200 МПа по сцеплению.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Азовцев А.И., Кулеш В.А., Огай А.С., Петров В.А. Развитие судов для условий грузовых операций на необорудованных берегах арктических и субарктических морей // Полярная механика: материалы третьей междунар. конф., 27–30 сентября 2016, Владивосток / науч. ред. А.Т. Беккер; Инженерная школа ДВФУ. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2016. С. 450–460. EDN: XYGQKF
2. Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение. Москва: Мир, 2001. 575 с.
3. Сборник нормативно-методических материалов Российского морского регистра судоходства. Книга 24. НД № 2-139902-029. Санкт-Петербург, 2016. 42 с.
4. Соколовский В.В. Теория пластичности. Москва: Высшая школа, 1969. 80 с.
5. Справочное пособие для обработки материалов инженерно-геологических изысканий. Москва: ДАР\ВОДГЕО, 2005. 94 с.
6. Степанюк И.А. Технологии испытаний и моделирования морского льда. Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 2001. 78 с.
7. Evaluation of LS-DYNA Soil Material Model 147. Report No. FHWA-HRT-04-094. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/04094/04094.pdf> – 28.04.2018.
8. Strength characterization of open-graded aggregates for structural backfills. Publication No. FHWA-HRT-15-034. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/15034/15034.pdf> – 28.04.2018.

Original article

DOI <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-1/11-19>

Mamontov A., Morev M., Molokov K., Novikov V.

ANDREY I. MAMONTOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Andrew.Mamontov@outlook.com, <http://orcid.org/0000-0001-9350-9559>MAXIM A. MOREV, Master Student of the direction “Shipbuilding, ocean engineering
and systems engineering of marine infrastructure facilities”, morev1@gmail.comKONSTANTIN A. MOLOKOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Department of Welding Engineering, (Associate Professor of *Vladivostok State University*),
spektrum011277@gmail.com

VALERY V. NOVIKOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,

Leka1551@rambler.ru

Polytechnic Institute

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

Determination of the parameters of watered sand by the method of static indentation of the indenter**Abstract.** In this paper, a formula for the passive pressure of the soil on the surface of the wedge at various angles at its apex is obtained based on the processing of the results of a numerical experiment. The discrepancies between the numerical values and the values obtained analytically are shown.

The parameters of watered sand were determined by the method of static indentation of the indenter.

Keywords: passive pressure, slip lines, indentation into the soil**For citation:** Mamontov A., Morev M., Molokov K., Novikov V. Determination of the parameters of watered sand by the method of static indentation of the indenter. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2023;(1):11–19. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Azovtsev A.I., Kulesh V.A., Ogai A.S., Petrov V.A. Ship's construction development for cargo operations in condition of the unimproved port facilities in arctic and subarctic coast. *Polar mechanics. Proc. of the Third Int. Sci. Conf., 27–30 September 2016, Vladivostok, Russia*. Sci. ed. A. Bekker. School of Engineering FEFU. Vladivostok, Far Eastern Federal University, 2016. P. 450–460. (In Russ.) EDN: XYGQKF
2. Kahaner D., Mowler K., Nash S. Numerical methods and software. Moscow, Mir, 2001. 575 p. (In Russ.).
3. Collection of regulatory and methodological materials of the Russian Maritime Register of Shipping. Vol. 24. ND No. 2-139902-029. St. Petersburg, 2016. 472 p.
4. Sokolovsky V.V. Theory of plasticity. Moscow, Vysshaya shkola, 1969. 180 p. (In Russ.).
5. Reference manual for processing materials of engineering and geological surveys. Moscow, DAR\VODGEO, 2005. 94 p. (In Russ.).
6. Stepanyuk I.A. Technologies for testing and modeling sea ice. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2001. 78 p. (In Russ.).
7. Evaluation of LS-DYNA Soil Material Model 147. Report No. FHWA-HRT-04-094. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/04094/04094.pdf> – 28.04.2018.
8. Strength characterization of open-graded aggregates for structural backfills. Publication No. FHWA-HRT-15-034. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/-15034/-15034.pdf> – 28.04.2018.