Проектирование и конструкция судов

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-8>
УДК 629.128

Т.И. Бессонова, А.С. Бобылева, В.С. Ильин, Н.А. Лютиков, А.И. Мамонтов

БЕССОНОВА ТАТЬЯНА ИГОРЕВНА – магистрант, e-mail: bess95@list.ru

БОБЫЛЕВА АНАСТАСИЯ СТАНИСЛАВОВНА – магистрант,
e-mail: bobyleva_as@mail.ru

ИЛЬИН ВИТАЛИЙ СЕРГЕЕВИЧ – магистрант, e-mail: vitality-s@list.ru

ЛЮТИКОВ НИКИТА АНДРЕЕВИЧ – магистрант, e-mail: nikliutikov@gmail.com

МАМОНТОВ АНДРЕЙ ИГОРЕВИЧ – к.т.н., доцент,
e-mail: mamontov.ai@dvfu.ru

Кафедра кораблестроения и океанотехники Инженерной школы

Дальневосточный федеральный университет

Суханова ул., 8, Владивосток, Россия, 690091

Определение давления и траектории движения носовой части судна при контакте с грунтом

Аннотация: Рассчитано давление грунта на днище корпуса по траектории движения носовой части корпуса при швартовке к необорудованному берегу.

В отличие от предыдущих работ представленный в статье расчёт учитывает силы инерции движения корпуса судна при контакте. Результат расчёта с учётом динамики более точен, чем расчёт при учете только статики. Показано, как можно моделировать процесс динамического взаимодействия корпуса судна и грунта. Моделирование позволяет рассчитать давление при динамическом контакте, т.е. «с ходу», грунта на корпус судна, определить размеры и места усиления днища судна.

Ключевые слова: давление грунта, траектория движения, носовая часть, корпус судна.

Введение

Вопросом расчёта прочности судов, эксплуатация которых предусматривает посадку на грунт, занимались Азовцев А.И., Кулеш В.А., Огай А.С., Петров В.А. (см., например, [1]). Результатом их исследований является руководящий документ [3], в котором рассматривается ограничение нагрузки на корпус судна для случаев обсушки, т.е. когда судно коснулось грунта в результате отлива. Этих исследований недостаточно для практических потребностей, так как при эксплуатации суда касаются грунта, имея начальную скорость.

Цель работы – показать на тестовых примерах способы расчёта давления при динамическом контакте корпуса судна с грунтом.

При контакте часть днища корпуса погружается в грунт и движется по некоторой траектории. Траектория движения является результатом действия сил инерции корпуса, давления грунта и силы трения, ее важно знать, так как чем больше удаление нижней точки днища от поверхности грунта, тем выше давление. Здесь и далее «нижняя точка днища» – это нижняя точка плоскости, заменяющей днище, точка 2. По траектории движения можно определить площадь днища, контактирующую с грунтом. В последующем эта часть днища должна быть дополнительно усилена.

Поверхность грунта считается наклонной плоскостью, установленной под углом α к горизонтальной.

Корпус судна считается абсолютно жестким по отношению к грунту.

Свою траекторию описывает каждая точка днища, но в этой работе траектория строится для нижней точки плоскости, заменяющей днище, что позволяет найти максимум давления грунта.

Для определения давления, горизонтального и вертикального усилий используется гипотеза плоского предельного равновесия, в которой грунт представлен моделью жестко-пластического тела.

Учитывается торможение за счёт силы трения и торможение при раздвигании грунта.

Модель материала грунта учитывает его плотность, пластические свойства: сцепление и угол внутреннего трения. Давление грунта на днище зависит от свойств грунта и от формы корпуса судна. Форма корпуса моделируется наклонной плоскостью, заменяющей только ту часть корпуса, которая находится ниже поверхности грунта. Замена сложной формы днища простой плоскостью упрощает расчёты и позволяет легко проанализировать влияние исходных данных на результат расчёта давления.

В работе проводится численный эксперимент, где носовая оконечность судна, представленная одной симметричной относительно ДП (диаметральная плоскость) наклонной плоскостью, сталкивается с поверхностью грунта. Грунт пластически деформируется, и плоскости заходят под поверхность грунта. Грунт оказывает давление на плоскости.

На основании данных о весе носовой оконечности, водоизмещении судна, изменении веса на единицу высоты подъёма составляются уравнения вертикального и горизонтального ускорения, которые действуют на носовую оконечность. После численного интегрирования получается траектория движения нижней точки плоскости. Траектория движения не параллельна поверхности морского дна. Носовая часть корпуса судна из-за действия сил инерции погружается в грунт сильнее в начале контакта и после остановки, в конце траектории. В нижней точке траектории действует максимальное давление грунта, поэтому на этих участках давление грунта на корпус максимальное.

По траектории можно определить максимальную площадь пятна контакта и распределение давления внутри неё.

В работе приводятся примеры определения давления на корпус судна. Рассматривается произвольное судно с общей формой корпуса при наличии бульба.

Исходными данными для расчета являются параметры судна и морского дна: скорость, водоизмещение, осадка и угол дифферента, угол наклона морского дна у берега и свойства грунта.

Движение носовой части корпуса вверх при контакте с грунтом можно разделить на поступательное и вращение вокруг центра тяжести, т.е. изменение дифферента. При расчете условно считается, что во вращательном движении участвует половина водоизмещения, поэтому далее в формуле (16) водоизмещение делится на 2.

Определение давления при динамическом взаимодействии корпуса судна с грунтом

Важной составляющей для определения давления при динамическом взаимодействии корпуса судна с грунтом является расчёт траектории движения носовой части корпуса. Зависимость вертикальной координаты от горизонтальной рассчитывается для нижней точки плоскости. На траектории определяется точка, максимально удалённая от поверхности грунта, и для этой точки рассчитывается давление.

Давление на плоскости

Давление рассчитывается как пассивное давление грунта на наклонную плоскость по формуле (1), см. рисунки 1 и 2 [4].

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

где β – угол наклона плоскости к вертикали, рад.;
 γ – удельный вес грунта, Н/м³;
 ρ – угол внутреннего трения грунта, рад.;
 x' – координата вдоль плоскости, м.

Рис. 1. Наклон плоскости треугольника 1–2–3 к плоскости Х0У:
 а – ориентация плоскости 1–2–3; б – вид сверху. Здесь и далее рисунки А.И. Мамонтова.

Рис. 2. Локальная и глобальная системы координат.

Для расчёта давления локальная ось x' направляется так, чтобы начало отсчёта было на поверхности грунта, а сама ось проходила вдоль наклонной плоскости.

Расчёт равнодействующей давления

Для простоты расчета днище корпуса в носовой части заменяется плоскостью 1–2–3. Ориентация плоскости 1–2–3 принята на основании двух критериев: 1) объём носовой части под поверхностью грунта равен объёму, ограниченному плоскостью 1–2–3 слева и справа от ДП, и поверхностью грунта; 2) равнодействующая силы давления грунта равна весу носовой части.

Линия 1–2 – это линия пересечения горизонтальной плоскости Х0У и плоскости 1–2–3. Линия 1–3 – это линия пересечения плоскости 1–2–3 и поверхности грунта.

Для нахождения равнодействующей давления грунта на плоскость 1–2–3 нужно проинтегрировать уравнение (1) по площади треугольника 1–2–3.

Интегрирование производится в системе координат Х0У. Координата x' в формуле (1) должна быть выражена через координаты x, y . Локальная ось x' располагается перпендикулярно линии 1–2.

Оси X, Y поворачиваются вокруг оси Z на угол α параллельно проекции линии 1–2 и перпендикулярно оси x' , как показано на рис. 1, б.

Поворот осей обусловлен переходом от системы X0Y к системе отсчёта оси x' .

Рассматривая проекцию треугольника 1–2–3 на рис. 1, б, у необходимо выразить через x для линии 1–3:

$$y = y_3 - x \cdot y_3/x_1. \quad (2)$$

Вводится угол наклона линии 1–2 и линии 1–3:

$$\text{ang}_- = \arctan[y_2/x_1], \text{ang} = \arctan[y_3/x_1]. \quad (3)$$

Следовательно, координата x' выражается через текущие координаты:

$$x' = \frac{1}{\cos(xy)} \cdot \left[\frac{\sin(\text{ang})}{\sin(\pi - \text{ang} - \text{ang}_-)} \right] \cdot [y_3 - x \cdot y_3/x_1 - y], \quad (4)$$

где x и y – текущие координаты, xy – угол наклона плоскости 1–2–3 к плоскости X0Y.

$$xy = \arccos \left[-\frac{y_2 - y_3}{y_2 \cdot y_3} \cdot \left[1 / \sqrt{(1/x_1)^2 + (1/y_2)^2 + \left(\frac{y_2 - y_3}{y_2 \cdot y_3} \right)^2} \right] \right]. \quad (5)$$

Для определения компонента вектора F_n находятся углы наклона плоскости 1–2–3 к плоскостям xz и yz :

$$xz = yz = \arccos \left[1/y_2 \cdot \left[1 / \sqrt{(1/x_1)^2 + (1/y_2)^2 + \left(\frac{y_2 - y_3}{y_2 \cdot y_3} \right)^2} \right] \right]. \quad (6)$$

Пример.

Пусть заданы координаты $y_3 = 7.6855$, $y_2 = 2.8047$, $x_1 = 7.2302$, эти значения отмечены на рис. 1, б. Зная координаты, находятся углы $\text{ang}_- = 21.26^\circ$, $\text{ang} = 46.75^\circ$.

Вводятся значения: $y = 1.5$, $x = 5$; x' рассчитывается по формуле

$$x' = \frac{1}{\cos(xy)} \cdot \left[\frac{\sin(46.75)}{\sin(\pi - 46.75 - 21.26)} \right] \cdot [7.6855 - 5 \cdot 7.6855/7.2302 - 1.5] = 0.68/\cos(xy).$$

Отрезок 0.68 – это проекция x' на плоскость X0Y, которая показана на рис. 1, б.

x' находится делением проекции на $\cos(xy)$. Таким образом, для нахождения значения x' достаточно знать значения x и y . Если известны значение x' и угол наклона плоскости β , то можно применить формулу расчёта давления грунта (1).

Интегрирование давления производится по формуле (1) в системе X0Y, при этом каждой паре значений x и y соответствует значение x' .

Интеграл представлен уравнением (7):

$$F_n \int_0^{x_1} \int_{-y_2 \cdot (x-x_1)/x_1}^{-y_3 \cdot (x-x_1)/x_1} \left(\frac{1+\sin(\rho)}{1-\sin(\rho)} \cdot \left(c \cdot \text{ctg}(\rho) \cdot \exp \left(2 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - xy \right) \cdot \text{tg}(\rho) \right) + \gamma \cdot x' \cdot \left(-1.5 \cdot \cos \left(2 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - xy \right) \right) + 2.5 \right) - c \cdot \text{ctg}(\rho) \right) dy \cdot dx, \quad (7)$$

где x_1, y_2, y_3 , – не равные нулю координаты треугольника 1–2–3. Из них независимой переменной является y_2 , остальные вычисляются по y_2 .

Таким образом, равнодействующая F_n является функцией координаты y_2 .

x' – координата в формуле (4).

Расчёт F_n по формуле (7) в Excel

Для расчёта F_n в Excel по (7) применяются результаты интегрирования. Для простоты расчёта в Excel результаты интегрирования нужно разбить на части.

Вводятся обозначения:

$$A = \frac{1+\sin(\rho)}{1-\sin(\rho)} \cdot \left[c \cdot \operatorname{ctg}(\rho) \cdot \exp \left(2 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - xy \right) \cdot \operatorname{tg}(\rho) \right) \right], \quad (8)$$

$$B = \frac{1+\sin(\rho)}{1-\sin(\rho)} \cdot \gamma \cdot \left[-1.5 \cdot \cos \left(2 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - xy \right) \right) + 2.5 \right], \quad (9)$$

$$N = \frac{\sin(\operatorname{ang})}{\sin(\pi - \operatorname{ang} - \operatorname{ang}_\perp)}, \quad (10)$$

$$C = c \cdot \operatorname{ctg}(\rho). \quad (11)$$

F_n можно выразить:

$$F_n = x_1 \cdot \left[y_2^2 \cdot (1 - k_p^2) \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{N \cdot B}{\cos(xy)} + y_2 \cdot (1 - k_p) \cdot \left(\frac{C-A}{2} - \frac{1}{3} \cdot \frac{N \cdot y_3 \cdot B}{\cos(xy)} \right) \right]. \quad (12)$$

Проекции вектора F_n на оси координат определяются:

$$F_z = \cos(xy) \cdot F_n, \quad (13)$$

$$F_x = F_y = \cos(xz) \cdot F_n. \quad (14)$$

Расчёт траектории движения носовой части корпуса судна

Траектория движения носовой части корпуса является результатом интегрирования уравнения динамики. Расчёт каждого шага траектории зависит от формы траектории на предыдущих шагах.

Расчёт сделан в предположении, что перед контактом с грунтом отсутствует волнение и тяга двигателя судна. Вектор скорости судна горизонтален.

Поверхность корпуса заменяется двумя плоскостями. Плоскости симметричны относительно ДП. Левая плоскость обозначена точками 1–2–3 на рис. 1. Поверхность грунта находится под углом α .

Равнодействующая давления грунта $F_n(y_2)$ действует по нормали к плоскости 1–2–3. Равнодействующую можно разложить на горизонтальную, вертикальную и поперечную составляющие. Вектор F_n состоит из трех векторов: F_x , F_y , F_z . Вертикальная сила заменяет силу поддержания и заставляет нос судна подниматься вверх. Горизонтальная сила тормозит корпус. Появляются вертикальная скорость и вертикальное ускорение. Поперечная сила сжимает корпус и повышает трение, вследствие чего траектория движения сокращается. Действие силы создает трение, которое учитывается коэффициентом трения в формулах (15) и (16).

Движение носовой части корпуса в грунте разделяется на горизонтальную и вертикальную составляющие y_2 и z_2 :

y_2 – горизонтальная координата точки 2,

z_2 – вертикальная координата.

Уравнение горизонтального движения:

$$d^2 y_2 / dt^2 = - [F_y + \mu \cdot (F_z + F_x)] / \Delta, \quad (15)$$

где F_y – сумма проекций на ось Y всех сил, действующих на корпус со стороны грунта;

Δ – водоизмещение (масса) судна;

μ – коэффициент трения.

Уравнение вертикального движения:

$$d^2z_2/dt^2 = 4 \cdot [F_z + \mu \cdot (F_x + F_y)]/\Delta - 2 \cdot FPM \cdot z_2/\Delta, \quad (16)$$

где F_z – сумма проекций на ось Z всех сил, действующих на корпус со стороны грунта;
 FPM – коэффициент, характеризующий зависимость изменения вертикальной силы от высоты подъёма носовой оконечности, Н/м.

Минус в уравнениях ставится в случае уменьшения ускорения. Уменьшается в горизонтальном движении и за счет увеличения веса при выталкивании из воды.

Водоизмещение в (16) делится на 2, так как вверх движется половина водоизмещения судна. Пояснение, почему именно половина, дано ниже в пункте «Обсуждение результатов».

Расчёт учитывает силы трения через коэффициент μ и сопротивление грунта при его «раздвигании» корпусом через проекцию силы F_y в уравнении (15). Гидродинамические силы различного характера не учитываются

Уравнения (15) и (16) являются однородными дифференциальными уравнениями 2-го порядка. Компоненты F_y , F_z , F_x , входящие в эти уравнения, являются функциями независимой координаты y_2 , которая функционально связана с переменными y и z , см. уравнение (17). Поэтому интегрирование уравнений (15) и (16) в аналитическом виде представляется затруднительным. Уравнения (15) (16) интегрируются численно [2].

Глобальная система координат обозначается $X_{Gl}Y_{Gl}Z_{Gl}$. В ней строится траектория: зависимость координаты z от y . Начало отсчёта этой системы совпадает с началом траектории движения носовой части корпуса.

Локальная система координат XYZ ориентирована в пространстве параллельно глобальной системе $X_{Gl}Y_{Gl}Z_{Gl}$. Изменением формы днища относительно поверхности грунта из-за изменения дифферента мы пренебрегаем. Координата y_2 локальной системы связана с глобальными координатами y и z уравнением (17), см. рис. 2.

$$y_2 = y - z \cdot \text{ctg}(\alpha). \quad (17)$$

Начало отсчёта локальной системы совпадает с поверхностью грунта и диаметральной плоскостью судна.

Плоскость 1–2–3 пересекает оси локальной системы координат в точках 1, 2 и 3. Так как ее угол наклона остается постоянным, то при увеличении координаты y_2 линейно увеличиваются координаты этих точек и площадь треугольника 1–2–3. Чем больше площадь, тем больше суммарное давление.

Вместе с суммарным давлением увеличивается равнодействующая сила F_n . Корпус сильнее тормозит и сильнее выталкивается вверх.

Для численного интегрирования время контакта корпуса с грунтом разбивается на малые шаги времени Δt .

На каждом участке времени Δt глобальная координата (y) увеличивается пропорционально текущей скорости. По площади плоскости 1–2–3 рассчитывается равнодействующая сила F_n , определяются проекции F_y , F_z , F_x . По второму закону Ньютона определяется ускорение носовой части. По ускорению определяется изменение начальной скорости. Изменение складывается с текущей скоростью. По текущей скорости определяется изменение перемещения в горизонтальном и вертикальном направлении. Изменение перемещения складывается с текущей координатой. Расчёт повторяется на следующем шаге и т.д.

При подъёме увеличивается вертикальная координата z . После расчёта глобальной координаты y требуется снова рассчитать относительную координату y_2 по уравнению (17), повторить расчёт силы F_n и параметров движения.

На каждом шаге требуется несколько подшагов для уточнения y_2 и y . Количество подшагов принимается таким, чтобы y_2 и y не менялись с точностью до 6-го знака после запятой.

После уточнения y_2 проводится следующий шаг. Расчёт траектории представлен в виде схемы (рис. 3).

Исходные данные: $v_1, \Delta t$, водоизмещение	Расчёт силы и ускорений	Расчёт скорости $\Delta v_y, \Delta v_z$	Расчёт скорости v_y, v_z	Расчёт пути $\Delta y, \Delta z$	Расчёт полного пути
Шаг 1. $y_2 = v_1 \cdot \Delta t$					y_{G1}, z_{G1}
Подшаг 1.1. $y_2 = y_{G1} - \cot(\alpha) z_{G1}$			$v_y = \Delta v_y + v_1$ $v_z = \Delta v_z$	$\Delta y = v_y \cdot \Delta t$ $\Delta z = v_z \cdot \Delta t$	$y_{G1} = \Delta y + y_{G1}$ $z_{G1} = \Delta z + z_{G1}$
Подшаги...
Шаг 2. $y_2 = y_{G1} - \cot(\alpha) z_{G1}$			$v_y = \Delta v_y + v_y$ $v_z = \Delta v_z + v_z$	$\Delta y = v_y \cdot \Delta t$ $\Delta z = v_z \cdot \Delta t$	$y_{G1} = \Delta y + y_{G1}$ $z_{G1} = \Delta z + z_{G1}$
Подшаг 2.1. $y_2 = y_{G1} - \cot(\alpha) z_{G1}$
Подшаги...					

Рис. 3. Схема расчёта траектории.

Пояснения к схеме.

Заданы исходные данные: начальная скорость, водоизмещение, коэффициент FPM и свойства грунта. Задано бесконечно малое приращение времени Δt .

Первый шаг

Определяется путь за время Δt на первом участке траектории.

Пусть на первом участке сила равна нулю $F_n = 0$, т.е. сопротивления нет, следовательно, путь, пройденный на первом участке $y_2 = v_1 \cdot \Delta t$, где v_1 – начальная скорость.

Второй шаг

Определяются проекции нормальной силы на оси координат умножением F_n на косинусы углов наклона к плоскостям координат.

Определяется горизонтальное и вертикальное ускорения.

Так как Δt бесконечно малая величина, то ускорение на каждом Δt постоянное.

Горизонтальное ускорение равно

$$a_y = \left[-2 \cdot (F_y + \mu \cdot (F_z + F_x)) \right] / \Delta, \quad (18)$$

Вертикальное ускорение равно

$$a_z = \left[4 \cdot (F_z + \mu \cdot (F_x + F_y)) \right] / \Delta - 2 \cdot \text{FPM} \cdot z / \Delta. \quad (19)$$

Ускорение вызывает изменения: отрицательное – горизонтальной скорости $v_y = v_1 - a_y \cdot \Delta t$; положительное – вертикальной $v_z = a_z \cdot \Delta t$.

Горизонтальная координата: $y = y + v_y \cdot \Delta t$, вертикальная координата: $z = v_z \cdot \Delta t$.

Уточняется относительная координата $y_2 = y - z \cdot \text{ctg}(\alpha)$, см. рис. 2, и расчет повторяется необходимое количество раз.

Третий шаг

Для расчёта F_n используется относительная координата y_2 из второго шага и повторяется расчёт для второго шага. В расчёт ускорения по формуле (16) подставляется текущая координата z , отмечено пунктирной линией на схеме (рис. 3).

Полученные значения прироста скорости и прироста координаты на каждом подшаге третьего шага складываются с текущей скоростью и текущей координатой из последнего подшага второго шага.

Примеры расчёта траектории носовой части корпуса и максимального давления грунта

Пример 1

На рис. 5 показан результат расчёта траектории движения точки 2 плоскости 1–2–3.

Водоизмещение $\Delta = 6235$ т. Начальная скорость $v = 5.61$ м/с. Коэффициент FPM = 3223 кН/м. Угол наклона поверхности грунта $\alpha = 10^\circ$. Угол внутреннего трения грунта 30° (0.524 рад.). Плотность $\gamma = 2 \cdot 10^4$ Н/м³. Сцепление $c = 5$ кПа. Угол наклона плоскости 1–2–3 к ОП 0.587 рад. (33°) Угол наклона к миделю равен углу наклона к ДП 1.168 рад. Шаг времени 0.25 с.

Траектория движения точки 2 представлена на рис. 5.

Чтобы определить максимальное давление грунта на корпус судна, нужно определить максимальное расстояние от поверхности грунта до нижней точки плоскости вдоль оси x' . Для этого наибольшее расстояние от линии поверхности грунта до линии траектории нужно разделить на косинус угла наклона плоскости 1–2–3 к вертикали.

Видно, что нижняя точка плоскости проходит около 19 м до полной остановки. Высота подъёма 2 м. Максимальное расстояние от поверхности грунта до нижней точки в конце траектории составляет 1.2 м.

Угол β – это прямой угол минус угол наклона плоскости 1–2–3 к ОП. Это тот же угол β , что и в формуле (1), только по отношению к ОП. Угол наклона $\beta = 1.57 - 0.587 = 0.984$ рад. Рассчитаем координату вдоль плоскости 1–2–3. $x' = 1.2 \text{ м} / \cos(0.984) = 2.17 \text{ м}$.

Рис. 5. Пример расчёта 1. Определение наибольшего расстояния от поверхности грунта до траектории движения.

Подставляются свойства грунта, координата x' и угол β в формулу расчёта давления (1):

$$p(x') = \frac{1 + \sin(30^\circ)}{1 - \sin(30^\circ)} \cdot [5 \cdot 10^3 \cdot \operatorname{ctg}(30^\circ) \cdot \exp(2 \cdot 0.984 \cdot \operatorname{tg}(30^\circ)) + x' \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot (-1.5 \cdot \cos(2 \cdot 0.984) + 2.5)] + 5 \cdot 10^3 \cdot \operatorname{ctg}(30^\circ).$$

Давление в нижней точке: $p(2.17) = 0.473$ МПа.

Давление у поверхности грунта: $p(0) = 72$ кПа.

Пример 2

Водоизмещение $\Delta = 4300$ т. Начальная скорость $v = 7.65$ м/с. Коэффициент FPM = 2409 кН/м. Угол наклона поверхности грунта $\alpha = 15^\circ$. Угол внутреннего трения грунта 30° (0.524 рад.). Плотность $\gamma = 2 \cdot 10^4$ Н/м³. Сцепление $c = 5$ кПа. Угол наклона плоскости 1–2–3 к ОП 0.79 рад. Шаг времени 0.13 с.

Траектория движения точки 2 представлена на рис. 6.

Рис. 6. Пример расчёта 2. Определение наибольшего расстояния от поверхности грунта до траектории. Голубая траектория для массы, движущейся вертикально, $0.5 \cdot \Delta$, зелёная – для массы $0.6 \cdot \Delta$.

При рассмотрении зелёной траектории видно, что точка 2 проходит по горизонтали 16.0 м. Высота подъёма носовой части корпуса на грунте 2.5 м. Максимальное расстояние от поверхности грунта до траектории по вертикали составляет 2.4 м, когда корпус прошел 10 м по горизонтали в грунте.

Угол наклона $\beta = 1.57 - 0.79 = 0.78$ рад. Рассчитывается координата вдоль плоскости 1–2–3. $x' = 2.4 \text{ м} / \cos(0.78) = 3.8 \text{ м}$.

Подставляются свойства грунта, координата x' и угол β в формулу расчёта давления (1):

$$p(x') = \frac{1 + \sin(30^\circ)}{1 - \sin(30^\circ)} \cdot [5 \cdot 10^3 \cdot \text{ctg}(30^\circ) \cdot \exp(2 \cdot 0.984 \cdot \text{tg}(30^\circ)) + x' \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot (-1.5 \cdot \cos(2 \cdot 0.984) + 2.5)] + 5 \cdot 10^3 \cdot \text{ctg}(30^\circ).$$

Давление в нижней точке: $p(3.8) = 0.622 \text{ МПа}$.

Давление у поверхности грунта: $p(0) = 72 \text{ кПа}$.

Для голубой траектории: $x' \approx 2.3 \text{ м} / \cos(0.78) = 3.23 \text{ м}$, $p(3.23) = 0.537 \text{ МПа}$.

Обсуждение результатов

В работе выполнен расчёт траектории движения носовой части корпуса судна при контакте с грунтом.

Траектория движения судна существенно отличается от прямой линии, параллельной поверхности грунта. Как показывает расчёт, на отдельных участках траектории корпус судна погружается глубже в грунт, на других – находится ближе к поверхности. Вместе с этим меняется площадь контакта и давление грунта.

Для определения давления грунта замеряется максимальное расстояние от поверхности грунта до нижней точки на траектории и это значение подставляется в формулу (1).

В начале контакта корпуса давление выше, что приводит к устремлению нижней точки днища ближе к поверхности грунта, при этом носовая оконечность начинает подниматься вверх и движется по инерции, давление уменьшается. После остановки носовая часть опускается на грунт, давление снова увеличивается.

В примерах 1 и 2 на траектории движения носовой части корпуса выделяются два участка, на которых максимальное расстояние между траекторией движения и поверхностью грунта больше, чем на остальных. Для снижения давления на корпус судна желательно, чтобы давление в начале контакта было равно статическому давлению после подъёма носовой

части на грунт и остановки. В этом случае давление на всем протяжении контакта не будет превышать некоторую заданную величину.

На форму траектории носовой части корпуса влияют форма корпуса, параметры судна, свойства грунта и наклон морского дна. В одном случае максимальное расстояние от поверхности грунта до траектории может быть больше в начале траектории, а в другом – в конце.

Чем больше высота подъёма носа судна на грунте, тем больше вес вытесненной из воды носовой части и больше статическое давление. При большой высоте подъёма корпуса давление грунта максимальное после подъёма носовой части и остановки. Как следует из расчётов 1 и 2, так происходит при небольших углах наклона поверхности морского дна. Если угол наклона морского дна большой, то происходит увеличение давления в начале контакта.

Заметное влияние на траекторию движения оказывают форма днища корпуса судна и угол наклона морского дна. Для редкой формы корпуса, когда форштевень почти прямой, давление достигает одного максимума, так как корпус почти не поднимается на грунт, а врежется в него и останавливается. Статического давления в этом случае почти нет.

В этой работе использованы различные способы упрощения модели взаимодействия корпуса судна с грунтом. Принятые упрощения можно условно разделить на две группы: геометрические и физические. К геометрическим относится замена реальной формы корпуса плоскостью. С точки зрения расчёта такая замена наиболее проста. К физическим упрощениям относится модель материала грунта Кулона–Мора.

При расчетах форма корпуса заменяется не одной, а несколькими плоскостями, при этом объём вычислений и точность расчёта давления увеличатся. Если форма корпуса задана не плоскостью, а поверхностью более высокого порядка, то это приводит к усложнению формулы расчёта давления (1). Если угол наклона касательной к траектории движения носовой части корпуса становится больше угла наклона плоскости 1–2–3, то теоретически на этом участке корпус, моделированный плоскостью, отрывается от поверхности грунта. Из-за отсутствия контакта давление грунта на корпус становится равным нулю. Спустя некоторое время корпус опускается на грунт и контакт возобновляется, и так далее. В результате корпус движется не по криволинейной траектории, а по прямой линии под углом, равным углу наклона плоской части днища.

Для моделирования грунта применяется модель материала Кулона–Мора. Свойства грунта принимаются упрощённо, согласно строительным нормативам России. Такие нормы пригодны для статического воздействия. При динамическом воздействии грунт может вести себя иначе и иметь другие параметры. Так как другие параметры отсутствовали, использовались строительные нормы, таблица Б1 [5].

На берегу может быть не только песок, но и гравий. Свойства такого грунта можно выбрать на основании данных исследования Федеральной администрации автомобильных дорог США (FHWA) [8]. Для насыщенного влагой гравия угол внутреннего трения в зависимости от размера частиц составляет 35–55°. Это больше, чем в расчёте 1 и 2 для песка. Для сухого гравия он равен 45–65°. В отличие от Российских строительных норм исследование FHWA не указывает фиксированный угол внутреннего трения для песка. Угол варьируется в зависимости от сжатия. Предельная модель такого материала по форме ближе к параболе. Изменение модели материала изменяет формулу расчёта пассивного давления грунта.

На давление грунта влияет изменение формы его поверхности при деформации, а также изменение свойств при изменении расстояния от поверхности, насыщенность влагой и др. На побережье могут встречаться и крупнообломочные грунты. Исследованию свойств крупнообломочных грунтов посвящено немало работ последнего времени. Для исследования свойств применяются специальные машины прямого сдвига. Некоторые данные по таким грунтам можно узнать из [7].

Рассмотрим более точно, какая часть водоизмещения принимает участие в создании силы F_z в уравнении (16).

Момент, дифференцирующий судно на 1° .

$$M_{10} \approx R \cdot \nabla \cdot \gamma \cdot \operatorname{tg}(1^\circ).$$

Продольный метацентрический радиус,

$$R = I_f / \nabla, \text{ тогда}$$

$$M_{10} \approx I_f \cdot \gamma \cdot \operatorname{tg}(1^\circ).$$

Отношение силы на носовом перпендикуляре к вертикальному перемещению носа корпуса судна только из-за вращения или дифферента, коэффициент FPM, если ЦТ площади ватерлинии на середине длины судна, можно выразить так:

$$FPM \approx M_{10} / ((0.5 \cdot L)^2 \cdot \operatorname{tg}(1^\circ)) = I_f \cdot \gamma / (0.5 \cdot L)^2.$$

В то же время $FPM = Fz/z$, откуда вертикальное перемещение носа при вращении равно $z = Fz \cdot (0.5 \cdot L)^2 / (I_f \cdot \gamma)$.

Поступательное движение судна вверх равно $z_{\text{ship}} = Fz / (S \cdot \gamma)$, где S – площадь действующей ватерлинии, или $I_f \approx \alpha^2 \cdot L^3 \cdot B / 14$.

Отношение перемещения носа судна при вращении к перемещению при поступательном движении $z/z_{\text{ship}} = 3.5 \cdot S / (\alpha^2 \cdot L \cdot B)$. Если $\alpha = 0.8$, то это отношение равно $z/z_{\text{ship}} = 4.3$. Если центр тяжести находится не на середине судна, а, например, на $0.45 \cdot L$ от НП, то тогда это отношение равно $z/z_{\text{ship}} = 3.5$. Возьмем среднее значение $z/z_{\text{ship}} = 4$. Это означает, что поступательное перемещение составляет 20%, перемещение носа вверх из-за вращения составит 80%.

Та часть, которая участвует во вращательном перемещении, составит только половину водоизмещения, так как нос поднимается, корма опускается. Тогда часть водоизмещения, которая принимает участие в создании силы Fz в уравнении (16), составляет $(20\% + 80\% \cdot 0.5) \cdot \Delta$, или $0.6 \cdot \Delta$.

На рис. 6 показаны две траектории: голубая – для веса $0.5 \cdot \Delta$, зелёная – для веса $0.6 \cdot \Delta$. При уменьшении веса с $0.6 \cdot \Delta$ до $0.5 \cdot \Delta$ траектория изменяется незначительно. Максимальное расстояние от поверхности грунта до траектории уменьшается с 2.4 м до 2.3 м. Давление грунта на нижнюю точку днища уменьшается с 622 кПа до 537 кПа. Среднее давление меняется менее существенно, так как возле поверхности грунта оно не варьируется вовсе.

Заключение и дальнейшие направления исследования

В заключении сравниваются полученные результаты с результатами расчёта по Правилам РМРС. Правила позволяют рассчитать только сосредоточенную силу, т.е. реакцию, для статического случая подъёма корпуса на грунте. Правила не учитывают давление до подъёма на грунт. Исходя из этого сравнивается реакция грунта, т.е. приводится давление и площадь контакта к одной сосредоточенной силе и сравнивается с результатом расчёта по Правилам. Результаты сравнения должны быть одного порядка.

Согласно п. 3.13.3.6 Правил значение величины статической концевой реакции грунта, кН, для судов с частичной осушкой класса NAABSA 3 не должно приниматься менее $5/12 g \Delta n$. Для примера: $1 \Delta n = 6000$ т, статическая концевая реакция составит $R_N^m = 50/12 \cdot 6000 = 25$ МН. Давление по Правилам неизвестно, так как неизвестна площадь контакта.

Площадь контакта определяется как удвоенная площадь треугольника 1–2–3. В максимуме она равна 50 м^2 . Максимальное давление по расчётам, представленным в работе, – 0.5 МПа , следовательно, суммарная реакция на корпус судна равна $0.5 \text{ МПа} \cdot 50 \text{ м}^2 = 25 \text{ МН}$. Это соответствует расчёту по Правилам.

У поверхности грунта давление меньше, чем в нижней точке днища, тогда суммарная реакция по выполненным расчётам окажется меньше, чем по Правилам. В результате реакция может быть снижена по сравнению с расчётом по Правилам.

Задача расчета динамического взаимодействия судна с грунтом крайне сложна и в теоретическом отношении, и в части исходных данных, среди которых форма поверхности и характер грунта, его неоднородность, возможное наличие течения и волн. При решении опи-

сываемых в статье задач используется ряд упрощающих допущений, которые являются предметом дальнейших исследований.

В дальнейших исследованиях можно использовать методы решения этой задачи, реализуемые в Excel, такие как модифицированный метод Эйлера или более сложный, но и намного более точный метод Рунге–Кутты. В будущем следует рассмотреть вопрос выбора шага по времени и оптимальной точности расчёта на каждом подшаге, так как при слишком большом шаге результаты могут оказаться несколько другими.

В дальнейшем, проводя расчеты уравнения движения, следует принимать во внимание возможную работу судовых движителей и гидродинамические силы, в числе которых сила инерции поступательного движения воды.

Продолжение исследований в данном направлении будет способствовать лучшему пониманию особенностей работы конструкций судна при выходе его на грунт.

Авторы выражают благодарность рецензенту за замечания и работу над статьей.

Вклад авторов в работу

Бессонова Т.И., Ильин В.С., Лютиков Н.А. – разработка отдельной программы тестового расчёта траектории движения нижней части днища в программе Excel и расчёт траекторий для тестовых примеров, Бобылева А.С. – полная разработка отдельной программы тестового расчёта траектории движения нижней части днища в программе Excel и расчёт траектории для тестового примера, Мамонтов А.И. – автор текста, руководство работой, разработка отдельной программы расчёта траектории и проверка результатов по данным тестовых примеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 сент. 2016 / науч. ред. А.Т. Беккер; Инженерная школа ДВФУ. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2016. С. 450–460.
2. Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение. Изд. 2-е. М.: Мир, 2001. 575 с.
3. НД № 2-139902-029. Сборник нормативно-методических материалов Российского морского регистра судоходства. Кн. 24. СПб., 2016. 107 с.
4. Соколовский В.В. Теория пластичности. Изд. 3-е. М.: Высшая школа, 1969. 80 с.
5. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83. М.: Изд-во стандартов, 2011. 162 с.
6. Степанюк И.А. Технологии испытаний и моделирования морского льда // Федеральная целевая программа «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997–2000 годы». СПб.: Гидрометеоздат, 2001. 78 с.
7. Evaluation of LS-DYNA Soil Material Model 147. 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. FHWA-HRT-15-034. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/15034/-15034.pdf> – 28.04.2018.

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-8>

Bessonova T., Bobyleva A., Ilyin V., Lyutikov N., Mamontov A.

TATYANA BESSONOVA, MS Student, e-mail: bess95@list.ru

ANASTASIA BOBYLEVA, MS Student, e-mail: bobyleva_as@mail.ru

VITALIY ILYIN, MS Student, e-mail: vitaly-s@list.ru

LYUTIKOV NIKITA, MS Student, e-mail: nikliutikov@gmail.com

ANDREY MAMONTOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
e-mail: mamontov.ai@dvfu.ru

Department of Shipbuilding and Ocean Engineering School of Engineering
Far Eastern Federal University

Sukhanova St., 8, Vladivostok, Russia, 690091

Measuring pressure and the vessel's bow trajectory in contact with the sea ground

Abstract: The ground pressure on the bottom of the hull is calculated along the vessel's bow trajectory during the mooring to an unequipped shore. Unlike previous works, the calculation presented in the article takes into account the inertia forces of the vessel's hull during the contact with the ground. The result of the calculation with due regard to the dynamics is more accurate than the calculation based only on the statics. The article demonstrates how to simulate the process of dynamic interaction between the hull and the ground.

Keywords: ground pressure, trajectory, bow, hull.

REFERENCES

1. Azovtsev A.I., Kulesh V.A., Ogay A.S., Petrov V.A. The Development of Vessels for the Conditions of Cargo Operations on the Unequipped Shores of the Arctic and Subarctic Seas. *Polar Mechanics: materials of the third intern. conf.* 2016. Vladivostok, 2016, Vol. 3. p. 450–460.
2. Kahaner D., Moler K., Nash S. *Numerical Methods and Software*. Ed. 2. M., Mir, 2001, 575 p.
3. ND N 2-139902-029. *Proceedings of Regulatory and Methodological Materials of the Russian Maritime Register of Shipping*. Book 24. St. Petersburg, 2016, 107 p.
4. Sokolovsky V.V. *Theory of Plasticity*. Ed. 3. M., Higher School, 1969, 80 p.
5. SP 22.13330.2011. *Foundations of buildings and structures*. Updated version of SNiP 2.02.01-83. M., Publishing house of standards, 2011, 162 p.
6. Stepanyuk I.A. *Technologies of Testing and Modeling of Sea Ice*. Federal Target Program *State Support for the Integration of Higher Education and Basic Science for the Years 1997–2000*. SPb., Gidrometeoizdat, 2001, 78 p.
7. Evaluation of LS-DYNA Soil Material Model 147. 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. FHWA-HRT-15-034. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/15034/15034.pdf> – 28.04.2018.