

УДК 539.1

UDC 539.1

РАСЧЕТ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ ПОНТОНА

PONTOON CARRYING CAPACITY CALCULATION

Галабурдин А. В., Метальникова В. В.

Galaburdin A. V., Metalnikova V. V.

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

5339850@mail.ru

5339850@mail.ru

Рассмотрен метод расчета грузоподъемности понтона, который сводится к решению обыкновенного дифференциального уравнения относительно глубины погружения понтона в воду. Метод реализуется с помощью системы компьютерной математики Maxima.

The paper considers the method of calculating the carrying capacity of a pontoon, which reduces to solving an ordinary differential equation with respect to the depth of the pontoon's immersion. The proposed method is realized using the Maxima computer mathematics system.

Ключевые слова: грузоподъемность понтона, обыкновенные дифференциальные уравнения.

Keywords: pontoon carrying capacity, ordinary differential equations.

Введение. Понтоны представляют собой плоскодонные несамоходные судна, служащие временными опорами, например, в конструкции понтонного моста. Большое количество работ посвящено расчету грузоподъемности понтонов, теоретическому [1–4] и экспериментальному [5–6] изучению их плавучести.

Материалы и методы. Авторами рассматривается способ расчета понтона при действии статической и динамической нагрузок. Понтон имеет форму цилиндра, основания которого представляют собой часть круга, заключенного между его диаметром и параллельной диаметру хордой (рис. 1).

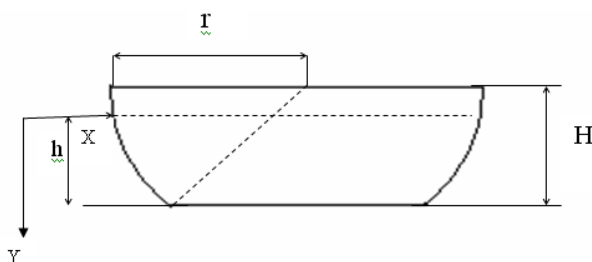


Рис. 1 Поперечное сечение понтона с параметрами:
H — высота, h — глубина погружения в воду

Для увеличения непотопляемости и жесткости понтона внутри корпуса закреплены продольные и поперечные вертикальные переборки (рис. 2).

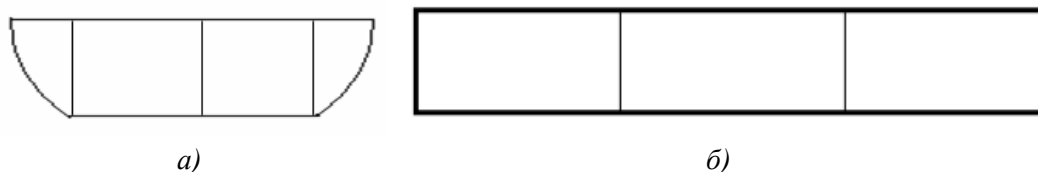


Рис. 2. Расположение продольных (а) и поперечных (б) переборок

Понтон изготовлен из листовой стали. Предполагается, что толщина дна понтона вдвое больше, чем толщина остальных стенок. Масса понтона определялась по формуле:

$$M_p = Sbp,$$

где S — площадь поверхности стального листа, который использовался при изготовлении понтона, b — толщина стального листа, ρ — плотность стали.

Площадь S включает площадь боковой поверхности понтона S_{δ} , площади двух торцов и двух поперечных переборок $4S_T$, площади трех продольных переборок $3S_n$, а также площади листа, используемого для усиления дна понтона S_{δ} :

$$S = S_{\delta} + 4S_T + 3S_n + S_{\delta}$$

Площадь боковой поверхности вычислялась по формуле:

$$S_{\delta} = Pd,$$

где d — длина понтона; P — периметр торца понтона, определяется из выражения:

$$P = 2r + 2r * \arcsin \frac{H}{r} + 2\sqrt{r^2 - H^2}.$$

Площади торца понтона, продольных переборок, а также листа стали, используемого для усиления дна, определялись по формулам:

$$S_T = r^2 \arcsin \frac{H}{r} + H\sqrt{r^2 - H^2};$$

$$S_n = Hd;$$

$$S_{\delta} = 2d\sqrt{r^2 - H^2}.$$

Объем воды, вытесняемой понтоном:

$$V = V_{\Pi} - V_o,$$

где V_{Π} — объем понтона; V_o — объем части понтона, находящейся над поверхностью воды. Указанные параметры определяются по формулам;

$$V_{\Pi} = S_T d = \left(r^2 \arcsin \frac{H}{r} + H\sqrt{r^2 - H^2} \right) d;$$

$$V_o = \left(r^2 \arcsin \frac{H-h}{r} + (H-h)\sqrt{r^2 - (H-h)^2} \right) d.$$

Сила, действующая вертикально вниз на нагруженный понтон, находящийся на воде:

$$F_T = M_p g + P,$$

где P — вес груза.

Сила, действующая на нагруженный понтон вертикально вверх:

$$F_A(h) = V(h)\rho g.$$

Это гидростатическая сила (сила Архимеда), пропорциональная массе вытесненной воды.

Глубину погружения понтона можно определить из уравнения:

$$F_A(h) = F_T.$$

Зная предельную глубину погружения, можно определить предельно допустимый вес груза.

Если нагрузка на понтон изменяется во времени, следует перейти к иной постановке задачи. Чем быстрее изменяется загрузка, тем отчетливее проявляются динамические процессы, и тем значительнее отличие состояния понтона от статического. Наибольшее отличие будет иметь место в случае мгновенного приложения нагрузки. Рассмотрим следующий случай.

Считаем, что на расположенный на воде понтон мгновенно прикладывается вертикальная сила, адекватная весу груза. Вертикальное движение, совершаемое понтоном в этом случае, описывается дифференциальным уравнением:

$$\left(M_p + \frac{P}{g} \right) \frac{d^2 y}{dt^2} = -F_A(y) + M_p g + P,$$

где y — вертикальное смещение понтона.

В этом уравнении не учтена сила сопротивления воды, пропорциональная скорости вертикального движения. Учитывая достаточно большую массу понтона, естественно предположить, что данная скорость будет достаточно мала и, следовательно, силой сопротивления можно пренебречь. Кроме того, можно предположить, что вертикальные перемещения понтона будут достаточно малыми и величину $\frac{H-y}{r}$ также можно считать малой. Это позволяет несколько упростить выражение, определяющее гидростатическую силу:

$$F_A(y) = \rho g \left(V_{II} - \left(r^2 \arcsin \frac{H-y}{r} + (H-y) \sqrt{r^2 - (H-y)^2} \right) d \right) \approx \approx \rho g (V_{II} - 2r(H-y)d).$$

В итоге получили линейное дифференциальное уравнение:

$$\left(M_p + \frac{P}{g} \right) \frac{d^2 y}{dt^2} + 2rd\rho g y = -\rho g (V_{II} - 2rHd) + M_p g + P.$$

Считая, что в начальный момент времени понтон находился на воде в состоянии покоя, данное уравнение следует решать при начальных условиях:

$$y(0) = h_c ;$$

$$\frac{dy(0)}{dt} = 0 ,$$

где h_c — глубина погружения ненагруженного понтона. Определяется из уравнения:

$$F_A(h) = M_{II} g .$$

Результаты исследования. Представленный метод реализован с использованием системы компьютерной математики Maxima [7]. Ниже представлены последовательность расчета и графические результаты.

Ввод исходных данных

H -высота пантона, d -длина, r -радиус, b -толщина стального листа,
Gp- плотность стали, Gv- плотность воды, Pm- вес груза

```
(%i1) H:1;d:5;r:3;b:0.01;Gp:7800;Gv:1000;Pm:90000;
(%o1) 1
(%o2) 5
(%o3) 3
(%o4) 0.01
(%o5) 7800
(%o6) 1000
(%o7) 90000
```

Определение силы Архимеда, как функции от глубины погружения h

```
(%i8) Far(h):=Gv*d*(asin(H/r)*r^2+H*sqrt(r^2-H^2)-asin((H-h)/r)*r^2-(H-h)*sqrt(r^2-(H-h)^2))*9.8$
```

Вычисление массы пантона

```
(%i9) Mp:2*r*d*b*Gp*(1+asin(H/r)+sqrt(1-H^2/r^2))+2*b*Gp*(asin(H/r)*r^2+H*sqrt(r^2-H^2))$
(%i10) MP:3*b*Gp*(asin(H/r)*r^2+H*sqrt(r^2-H^2))+3*H*d*b*Gp+2*d*sqrt(r^2-H^2)*b*Gp$
(%i11) Mp:Mp+MP$
```

```
(%i12) find_root(Far(h)=Mp*9.8+Pm, h, 0, H);
(%o12) 0.69153412408757
```

Расчет глубины погружения ненагруженного пантона

```
(%i13) find_root(Far(h)=Mp*9.8, h, 0, H);
(%o13) 0.38154719536195
```

```
(%i14) hc:%;
(%o14) 0.38154719536195
```

Расчет глубины погружения пантона в случае динамического нагружения

Определение отдельных слагаемых дифференциального уравнения описывающего вертикальные колебания пантона

```
(%i15) p:-Gv*d*(asin(H/r)*r^2+H*sqrt(r^2-H^2)-2*r*H)*9.8+(Mp*9.8+Pm)$
```

```
(%i16) a:2*d*Gv*r*9.8/(Mp+Pm/9.8)$
```

```
(%i17) c:p/(Mp+Pm/9.8)$
```

```
(%i18) depends(y,t);
```

```
(%o18) [y(t)]
```

```
(%i19) ode2('diff(y,t,2)+a*y=c, y, t)$
```

```
(%i20) ic2(%t=0,y=hc,diff(y,t)=0)$
```

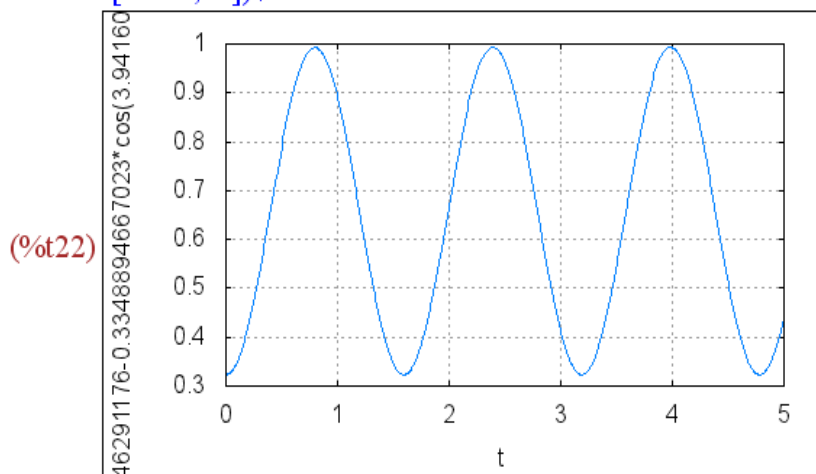
```
rat: replaced 0.38154719536195 by 8664511/22708884 = 0.38154719536195
```

```
(%i21) float(%), numer;
```

```
(%i21) float(%), numer;
```

```
(%o21) y = 0.69207852445943 - 0.31053132909747 cos(3.815299144901825 t)
```

```
(%i22) wxplot2d([0.65813046291176-0.3348894667023*cos(3.941601118125976*t)], [t,0,5],
[gnuplot_preamble, "set grid;"],
[nticks,25])$
```



Представленный график описывает вертикальные колебания понтона, возникающие при нагрузке $Pm = 9 \cdot 10^4$ Н. Как видно из графика, амплитуда колебаний в этом случае равна высоте понтона Н.

Заключение. Разработанный метод расчета позволяет с помощью относительно простой модели получить информацию о грузоподъемности понтона под действием как статической, так и динамической нагрузок.

Библиографический список

1. Васильев, А. Ю. Затухание свободных колебаний шара нейтральной плавучести в вязкой стратифицированной жидкости / А. Ю. Васильев, Ю. Д. Чашечкин // Прикладная математика и механика. — 2009. — Т. 73, № 5. — С. 776–786.
2. Черданцев, С. В. Уравнения движения понтонов в зумпфах угольных разрезов / С. В. Черданцев // Вестник Кузбас. гос. техн. ун-та. — 2013. — № 1(95). — С. 7–10.
3. Черданцев, С. В. Боковая качка понтонов в зумпфах угольных разрезов / С. В. Черданцев, Н. В. Черданцев // Вестник Кузбас. гос. техн. ун-та. // КиберЛенинка. — Режим доступа : <https://cyberleninka.ru/article/n/bokovaya-kachka-pontonov-v-zumpfah-ugolnyh-razrezov> (дата обращения : 20.10.2019).
4. Наумов, В. А. Численный метод решения трехмерной задачи равновесия сферического тела на тросе в потоке / В. А. Наумов, И. М. Ахмедов // Известия Калинингр. гос. техн. ун-та. — 2015. — № 37. — С. 63–72.
5. Монахов, В. П. Измерение плавучести физических тел / В. П. Монахов // РИА Стандарты и качество. — Режим доступа : <https://ria-stk.ru/mi/adetail.php?ID =41210> (дата обращения : 20.10.2019).
6. Мелехин, Д. Д. Экспериментальные исследования плавучести прямоугольного параллелепипеда / Д. Д. Мелехин, В. Ф. Першин // Международный студенческий научный вестник. — 2015. — № 3. — С. 205–206.
7. Чичкарев, Е. А. Компьютерная математика с Maxima. Руководство для школьников и студентов / Е. А. Чичкарев. — Москва : ALT Linux, 2012. — 384 с.