

УДК 629.113

Веретенников А.И., Мущинский Ю.М., Нефёдов А.В.

## **ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ БОЕВОЙ КОЛЁСНОЙ МАШИНЫ НА ПЛАВУ**

### **Введение**

При проектировании современных боевых колёсных машин очень часто предъявляется требование возможности плавучести машины и, в частности, обеспечения заданной максимальной скорости машины на плаву. При этом расчет максимальной скорости машины на плаву невозможно выполнить без предварительной оценки плавучести и остойчивости машины и определения сопротивления движению машины на плаву. Рассмотрим подробнее последнюю задачу.

### **Актуальность темы**

Так как очень сложно учесть сопротивление воды движению плавающей машины, определение сопротивления машины на плаву осуществляется сейчас либо путём натуральных или модельных испытаний, либо расчетом по эмпирическим формулам, полученным в результате обработки данных буксировочных испытаний плавающих машин и отражающих закон изменения сопротивления воды в функции скорости. К таким формулам можно отнести зависимости, предложенные в рассмотренных ниже методиках.

### **Изложение основного материала**

Сопротивление движению машины на плаву можно определить в соответствии с методикой [1]. Данная методика рассматривает результирующее сопротивление как сумму трёх составляющих: сопротивления трения  $R_t$ , сопротивления формы  $R_f$  и волнового сопротивления  $R_w$ . Такой подход позволяет выявить ту составляющую сопротивления, которая для данной машины является наибольшей.

**Сопротивление трения** обусловлено вязкостью воды:

Сопротивление плоской пластины

$$R_t = 0.5 \cdot \zeta_t \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \Omega, \text{ где}$$

$\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  – скорость движения машины, м/с;

$\Omega$  – площадь смоченной поверхности, м<sup>2</sup>;

$\zeta_t$  – безразмерный коэффициент сопротивления трения, зависящий от числа Рейнольдса

$\zeta_t = 0.455 \cdot (\lg Re)^{-2.58}$  – по формуле Прандтля-Шлихтинга,

где  $Re = \frac{VL}{\nu}$  – число Рейнольдса,

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с.

Увеличение шероховатости поверхности, обусловленное неравномерностью окраски, местными выступами от сварных швов и стыков листов и другими причинами, условно принимают не зависящим от числа Рейнольдса, оно учитывается коэффициентом

$$\Delta\zeta_T = (0.3 \div 0.7) \cdot 10^{-3}.$$

Верхний предел поправки принимается для сварных корпусов, нижний – для корпусов, имеющих более тщательно выполненную наружную обшивку.

Сопротивление трения машины с учетом шероховатости определяется по выражению

$$R_T = 0.5 \cdot (\zeta_T + \Delta\zeta_T) \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \Omega.$$

**Сопротивление формы** также обусловлено вязкостью воды и проявляется наиболее резко у плохо обтекаемых тел:

$$R_\Phi = 0.5 \cdot \zeta_\Phi \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \Omega, \text{ где}$$

$\zeta_\Phi$  – безразмерный коэффициент сопротивления формы, зависящий от числа Рейнольдса. При расчетах сопротивления формы для глубин воды не более 5 м  $\zeta_\Phi = 0.025-0.035$  (меньшие значения для колёсных машин, большие - для гусеничных).

**Волновое сопротивление**

$$R_B = 0.5 \cdot \zeta_B \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \Omega, \text{ где}$$

$\zeta_B$  – безразмерный коэффициент волнового сопротивления, зависящий от числа Фруда. При ориентировочных расчетах коэффициент волнового сопротивления следует определять по специальному графику ([1], стр.78, рис.41).

Полное сопротивление воды

$$R = R_T + R_\Phi + R_B$$

Рассмотрим определение буксировочного сопротивления на примере бронетранспортёра БТР-3 [2]. Исходные данные для расчета представлены ниже:

Длина корпуса L, м	7.65
Ширина корпуса B, м	2.9
Диаметр колеса D <sub>к</sub> , м	1.12
Ширина колеса B <sub>к</sub> , м	0.365
Плотность воды ρ, кг/м <sup>3</sup>	1000
Кинематический коэффициент вязкости воды ν при +5°C, м <sup>2</sup> /с	1.57·10 <sup>-6</sup>

Определим площадь смоченной поверхности машины и площадь наибольшего (миделевого) сечения подводной части корпуса и ходовой части. Для решения данной задачи воспользуемся расчетом плавучести бронетранспортёра [2].

$$\text{Площадь ватерлинии } S_{ВЛ} = 16.479 \text{ м}^2 [2]$$

$$\text{Условная высота погруженного объема машины } h_{усл} = 0.887 \text{ м} [2]$$

Ориентировочная площадь смоченной части корпуса и выступающих частей

$$S_{к+вч} = S_{ВЛ} + h_{усл} \cdot (2 \cdot B + 2 \cdot L) = 16.479 + 0.887 \cdot (2 \cdot 2.9 + 2 \cdot 7.65) = 35.195 \text{ м}^2$$

Площадь смоченной поверхности ходовой части

$$S_{XЧ} = 8 \cdot \left( 2 \cdot \frac{\pi \cdot D_K^2}{4} + B_K \cdot \pi \cdot D_K \right) = 8 \cdot \left( 2 \cdot \frac{\pi \cdot 1.12^2}{4} + 0.365 \cdot \pi \cdot 1.12 \right) = 26.038 \text{ м}^2$$

Суммарная ориентировочная площадь смоченной поверхности машины

$$S_{\Sigma} = S_{K+ВЧ} + S_{XЧ} = 61.233 \text{ м}^2$$

Площадь миделевого сечения определяется следующим образом

$$S_M = B h_k k_M + 2 B_K D_K = 3.56 \text{ м}^2,$$

где  $k_M$  – коэффициент полноты миделевого сечения ( в данном случае из анализа результатов расчета [2] можно определить  $k_M = 0.754$ )

Результаты расчета буксировочного сопротивления сведены в таблицу 1. Ветровая нагрузка в расчете не учитывается, т.к. данная составляющая пренебрежимо мала по сравнению с другими составляющими сопротивления движению.

Таблица 1

Наименование	Величина					
	6	7	8	9	10	11
Скорость машины v, км/ч						
Скорость машины v, м/с	1.67	1.94	2.22	2.5	2.78	3.06
Плотность воды $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1000					
Площадь смоченной поверхности $\Omega$ , м <sup>2</sup>	61.233					
Число Рейнольдса Re	8.1E+6	9.5E+6	1.1E+7	1.2E+7	1.4E+7	1.5E+7
Коэффициент сопротивления трения $\zeta_r$	0.0031	0.0030	0.0030	0.0029	0.0028	0.0028
Коэффициент, учитывающий шероховатость поверхности $\Delta\zeta_r$	0.0007					
Сопротивление трения машины с учетом шероховатости поверхности $R_r$ , Н	324.5	426.3	558.3	688.9	828.2	1003.4
Коэффициент сопротивления формы (колёсная ХЧ) $\zeta_{\phi}$	0.0025					
Сопротивление формы (колёсная ХЧ) $R_{\phi}$ , Н	2135	2881.3	3772.1	4783.8	5915.4	7167
Коэффициент волнового сопротивления $\zeta_{\text{в}}$	0.001	0.002	0.0035	0.004	0.0065	0.0075
Волновое сопротивление $R_{\text{в}}$ , Н	85.4	230.5	528.1	765.4	1538	2150.1
Буксировочное сопротивление (колёсная ХЧ) R, кгс	259.42	360.66	495.26	635.89	844.2	1052

Таким образом, поставленная задача решена, буксировочное сопротивление определено, но при этом необходимо отметить достаточную громоздкость применяемой методики. Однако существует другая методика [3], для гусеничных машин. Рассмотрим её подробнее, условно предполагая, что ходовая часть нашего бронетранспортёра является гусеничной с такими же габаритными размерами.

Буксировочное сопротивление:

$$R = (60F_r^2 - 30F_r + 6.35) S_M V^2, \text{ кгс}$$

где  $S_m = 3,56 \text{ м}^2$  – площадь наибольшего (миделевого) сечения подводной части корпуса и ходовой части машины;

$V$  - скорость машины, км/ч;

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gL}} - \text{число Фруда (относительная скорость)},$$

где  $V$  - скорость движения машины, м/с;

$L$  – характерный линейный размер (длина машины), м;

$g$  – ускорение силы тяжести,  $\text{м/с}^2$ .

Результаты расчета буксировочного сопротивления сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Наименование	Величина					
Скорость машины $v$ , км/ч	6	7	8	9	10	11
Площадь миделевого сечения $S_m, \text{м}^2$	3,56					
Число Фруда $F_r$	0.192	0.224	0.257	0.289	0.321	0.353
Буксировочное сопротивление $R, \text{кгс}$	358.85	460.7	593.1	775.4	1032.4	1392.7

Видно, что методика для гусеничных машин является значительно менее громоздкой. Теперь вернёмся к методике для колёсных машин и выполним расчет буксировочного сопротивления, также предполагая ходовую часть гусеничной (таблица 3).

Таблица 3

Наименование	Величина					
Скорость машины $v$ , км/ч	6	7	8	9	10	11
Скорость машины $v$ , м/с	1.67	1.94	2.22	2.5	2.78	3.06
Плотность воды $\rho$ , $\text{кг/м}^3$	1000					
Площадь смоченной поверхности $\Omega$ , $\text{м}^2$	61.233					
Число Рейнольдса $Re$	8.1E+6	9.5E+6	1.1E+7	1.2E+7	1.4E+7	1.5E+7
Коэффициент сопротивления трения $\zeta_r$	0.0031	0.0030	0.0030	0.0029	0.0028	0.0028
Коэффициент, учитывающий шероховатость поверхности $\Delta\zeta_r$	0.0007					
Сопротивление трения машины с учетом шероховатости поверхности $R_r$ , Н	324.5	426.3	558.3	688.9	828.2	1003.4
Коэффициент сопротивления формы (гусеничная ХЧ) $\zeta_\phi$	0.0035					
Сопротивление формы (гусеничная ХЧ) $R_\phi$ , Н	2989	4033.8	5281	6697.3	8281.5	10034
Коэффициент волнового сопротивления $\zeta_b$	0.001	0.002	0.0035	0.004	0.0065	0.0075
Волновое сопротивление $R_b$ , Н	85.4	230.5	528.1	765.4	1538	2150.1
Буксировочное сопротивление (гусеничная ХЧ) $R$ , кгс	346.47	478.14	649.07	830.94	1085.4	1344.3

Далее построим графики зависимости буксировочного сопротивления от скорости для различных методик в диапазоне скоростей 6-11 км/ч (рис. 1).

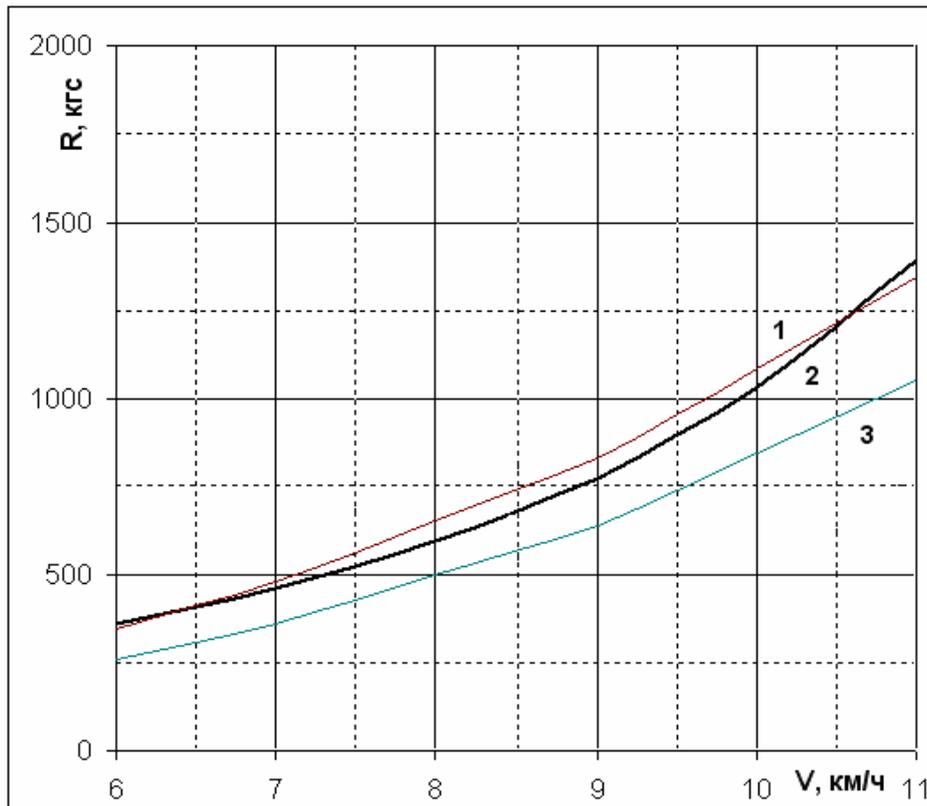


Рисунок 1 - Графічні залежності буксирного опору від швидкості  
1 – буксирний опір, визначений за методикою [3];  
2 – буксирний опір, визначений за методикою [1], але за умови гусеничної ходової частини;  
3 – буксирний опір, визначений за методикою [1] для машини з колісною ходовою частиною.

З рис.1 видно, що криві 1 і 2, побудовані за двома різними методами близько одна до одної, що свідчить про схожість вказаних методик.

### **Висновки**

На основі виконаного аналізу можна зробити наступні висновки:

1. Обидві розглянуті розрахункові методики [1] і [3] дають приблизно рівні значення опору води для гусеничних машин. При цьому методика [3] є менш громоздкою. При використанні методики [3] для колісних машин необхідно ввести поправочний коефіцієнт 0,78...0,80.

2. Перед розрахунком опору руху машини на плаву незалежно від застосованої методики необхідно виконати розрахунок плавучості изделия (визначити положення ватерлінії изделия).

3. Точність розрахунку суттєво залежить від того, наскільки контур изделия відрізняється від базового контура, за яким визначаються розрахункові коефіцієнти.

Література: 1. Степанов А.П. Конструювання і розрахунок плаваючих машин. - М.: Машинобудування, 1983. -200с. 2. БТР-3УН.03.РР-01. Бронетранспортёр БТР-3УН. Розрахунок плавучості і стійкості. Харків 2002. 3. Сергєєв Л.В. Теорія танка. - М.: Изд. Академії БТВ, 1973.

Веретенніков О.І., Мушинський Ю.М., Нефьодов А.В.

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ОПОРУ РУХУ БОЙОВОЇ КОЛІСНОЇ  
МАШИНИ НА ПЛАВУ

В статті розглянуте питання спрощення розрахунку опору руху бойової колісної машини на плаву при проектуванні шляхом порівняння результатів визначення опору води за різними методиками для колісних та гусеничних плавальних машин.

Veretennykov A.I., Mushshinskiy Yu.M., Nefyodov A.V.

TRACTIVE RESISTANCE CALCULATION PECULIARITIES OF A COMBAT  
WHEELED VEHICLE WHEN AFLOAT

The article describes the method to simplify tractive resistance calculation of a combat wheeled vehicle when afloat at the design stage by comparison of water resistance test results according to various methods for wheeled and tracked amphibious vehicles.

---