

УДК 629.12.532.59

С.В. Бугаєв

Військова академія, Одеса

---

## ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ОПОРУ ЗАНУРЕНОЇ ЧАСТИНИ БТР-3У ПРИ ЙОГО РУСІ ПО ВОДІ

*У статті наведені результати ви значення величини опору підводної частини моделі легкоброньованої плаваючої машини БТР-3У, який утворюється при її русі у воді. Результати, що наведені у роботі, були отримані при виконанні модельних дослідів у аеродинамічній трубі Одеського національного морського університету. Отримані дані можуть застосовуватися при розрахунку ходових якостей і машин, що плавають при експлуатації на воді.*

**Ключові слова:** легкоброньована машина, що плаває, опір води, аеродинамічна труба, модельні випробування.

### Вступ

**Постанова проблеми.** Швидкість руху по воді легкоброньованої машини, що плаває (ЛБМП), є однією з характеристик, що визначає як її тактичні можливості, так і конкурентну здатність машини на ринку озброєнь. Це добре показує аналіз літератури [1 – 6].

**Аналіз літератури.** В Україні було розроблено, модернізовано й випускається значна кількість зразків ЛБМП [1, 4, 6]. Кращі з них прийняті на озброєння й поставляються на експорт. По ряду основних бойових і технічних показників, на сьогоднішній день кращою вітчизняною ЛБМП є БТР-4 [7, 8], що розроблений колективом ХКБМ під

керівництвом Генерального конструктора А. І. Веретеннікова [9].

Ознайомлення з доступними публікаціями [1 – 10] показує, що, незважаючи на значний інтерес, який проявляється до поліпшення водохідних якостей ЛБМП, дослідження в області гідродинаміки плаваючої колісно-гусеничної техніки проводяться дуже рідко. Обмежує наукові дослідження, в основному, їхня вартість (за даними [11], година випробувань в аеродинамічному комплексі фірми «Порше» обходиться приблизно в 1,5 тис. євро). Тому будь-які дослідження з гідродинаміки ЛБМП є унікальними й представляють значний науковий інтерес.

**Мета й завдання дослідження.** Мета дослідження складалася у визначенні коефіцієнта лобового опору ( $C_x$ ) підводної частини ЛБМП БТР-3У.

Поставлена мета досягалася рішенням наступних наукових завдань:

- виготовлення моделі зануреної частини ЛБМП БТР-3У;
- проведення дослідження з визначення впливу швидкості потоку на величину опору моделі, визначення режиму «автомодельності»;
- розрахунок безрозмірного коефіцієнта опору моделі ( $C_x$ ) у повздовжній площині;
- проведення аналізу результатів дослідів.

## 1. Вирішення проблеми

Ходові якості на воді ЛБМП визначають [12]: загальний опір ( $R$ ), а також тяга водохідного рушія ( $P_c$ ). Рівняння силового балансу при прямолінійному русі з постійною швидкістю можна записати у вигляді [12]:

$$P_c = R = R_x + R_a, \quad (1)$$

де  $R_x$  – опір руху машини з боку води,  $R_a$  – опір повітря.

Сила  $R_a$  з достатньою для інженерних цілей точністю розраховується за методикою, що викладена у роботі [13]:

$$R_a = k_a \cdot F_n \cdot v_a^2, \quad (2)$$

де  $k_a$  – коефіцієнт обтічності надводної частини ЛБМП ( $k_a \approx 0,7 - 0,75$ ) [4];  $F_n$  – площа поперекового перерізу надводної частини машини;  $v_a$  – швидкість руху машини по воді.

Величина сили  $R_a$  при швидкостях руху ЛБМП по воді 6 – 10 км/год незначна й, як правило, вона не враховується [4]:

$$P_c \approx R_x. \quad (3)$$

У сучасній гідромеханіці силу опору руху плаваючого об'єкта з боку води вважають такою, що складається із трьох умовно незалежних складових:  $R_t$  – опору тертя,  $R_f$  – опору форми й  $R_v$  – хвильового опору [4]:

$$P_x = R_t + R_f + R_v. \quad (4)$$

При розрахунку  $R_t$  ЛБМП найчастіше використовують формулу Прандтля-Шліхтінга [12]:

$$R_t = 0,455 (\lg Re)^{-2,58}. \quad (5)$$

Роздільне визначення величин  $R_f$  і  $R_v$  для ЛБМП у зв'язку зі своєю складністю не проводиться. При випробуванні ЛБМП і їхніх моделей на воді, для визначення величини  $R_x$  найчастіше використовується вираз [12]:

$$R_x = R_b = R_{ost} + R_t, \quad (6)$$

де  $R_b$  – буксировочний опір,

$R_{ost}$  – залишковий опір ( $R_{ost} = R_f + R_v$ ) [12].

Як показують результати досліджень [4], при русі по воді ЛБМП зі збільшенням швидкості машини відбувається зміна її посадки й кута диференту. Це приводить до того, що значення величин  $R_f$  і  $R_v$  зі зміною швидкості руху по воді увесь час змінюються, що не дозволяє точному їхньому визначенню. Величина  $R_f$ , в основному, залежить від в'язкості середовища, і визначити її можна [4] при фіксованому положенні ЛБМП щодо поверхні води й при відсутності впливу  $R_v$ . Такі дослідження можуть бути проведені при чисельному моделюванні з використанням різних моделей плинності рідини, що описуються рівняннями Нав'є-Стокса з різним ступенем наближеності, а так само й методами фізичного моделювання в аеродинамічній трубі.

Для всіх відомих розрахункових методів [14] властиві недоліки, що знижують точність і можливість використання результатів розрахунків, а саме:

- розподіл тисків у кормовій частині корпусу, де спостерігається зрив потоку, не корелюється з експериментальними даними;
- при постановці завдань не враховуються місцеві зриви потоку з наступним формуванням вихрового сліду;
- всі розрахункові підходи при чисельних розрахунках засновані на панельному поданні форми тіла, а їхня точність у великому ступені залежить від точності математичного відтворення форми тіла.

Вірогідність результатів фізичного моделювання в аеродинамічній трубі визначається дотриманням критеріїв подоби моделі й природи. У транспортній аеродинаміці [13] основним критерієм подоби є рівність числа Рейнольдса для моделі й натурального об'єкта:

$$Re = v_m L_m / \nu_m = v_n L_n / \nu_n, \quad (7)$$

де  $v_m, v_n$  – швидкість потоку,  $L_m, L_n$  – лінійний розмір,  $\nu_m, \nu_n$  – в'язкість середовища, індекси:  $m$  – відповідає моделі,  $n$  – природі.

Через вплив ряду факторів [13] абсолютної рівності чисел  $Re$  для моделі й натурної ЛБМП досягти не вдається. Тому виникає необхідність проводити експерименти в аеродинамічній трубі при швидкостях потоку, які забезпечують сталість величини досліджуваних аеродинамічних характеристик моделі, режим так названої «автомодельності» [13].

## 2. Експериментальні дослідження

Дослідження з визначення опору води руху ЛБМП БТР-3У проводилося в аеродинамічній лабораторії Одеського національного морського університету (ОНМУ) під керівництвом та при особистій участі автора.

У якості об'єкту дослідження прийнято модель дубльованої підводної частини ЛБМП БТР-3У [13].

Модель (М) (рис. 1) виконувалася в масштабі 1:10 і мала такі геометричні розміри:

- довжина – 740 мм,
- ширина – 285 мм,
- глибина зануреної частини корпусу:
  - 136 мм – у носі,
  - 138 мм – у кормі,
- площа міделевого перерізу,  $S_x$  – 0,04 м<sup>2</sup>,
- діаметр коліс – 95 мм.

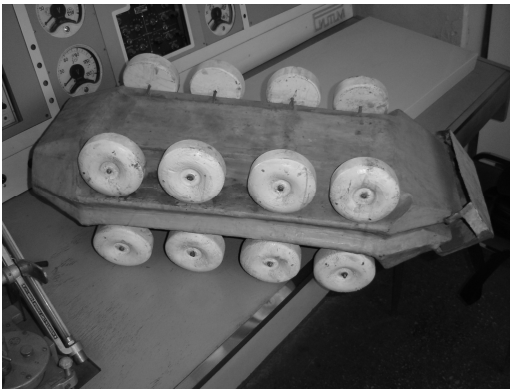


Рис. 1. Модель зануреної частини ЛБМП БТР-3У, що використовувалася у дослідках.

При виготовленні моделі досягалася геометрична подоба по основних елементах зануреної частини натурального зразка БТР-3У.

Корпус моделі виконаний з 15 мм фанери, у середині якого по центрі був установлений дерев'яний брус, що додавав моделі необхідну жорсткість при її кріпленні до державки аеродинамічних ваг. Після виготовлення корпус покривався гарячою оліфою, шпаклювався й полірувався. Зовнішня поверхня корпусу моделі і ходової частини покривалася розплавленим парафіном з 10% добавкою воску (для використання коефіцієнта тертя парафіну об повітря при розрахунках опору тертя). Товщина покриття становила 3 - 5 мм. Зовнішня поверхня корпусу моделі оброблялася з наступною точністю:

- для габаритних розмірів (висота й ширина)  $\pm 1,5$  мм;
- радіуси закруглення  $\pm 0,5$  мм;
- кути нахилу  $\pm 0,3^\circ$ .

Величина шорсткості поверхні моделі складала:  $h_{ш} < 0,05$  мм.

Дослідження проводилися в аеродинамічній трубі ОНМУ (рис. 2).

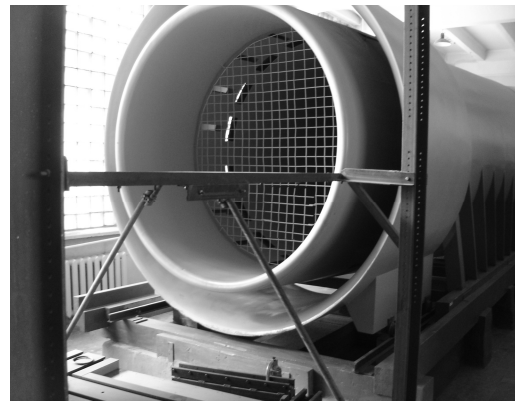


Рис. 2. Аеродинамічна труба Одеського національного морського університету

Труба мала замкнутий контур з відкритою робочою частиною. Основні її показники:

- ступінь поджаття потоку 5,1;
- поперековий переріз робочої частини 1,75 м;
- довжина робочої частини 2,46 м;
- діапазон швидкостей потоку 10 - 65 м/с;
- нерівномірність поля швидкостей  $\pm 1\%$ ;
- кути скосу потоку:
  - у вертикальній площині до  $\pm 0,3^\circ$ ,
  - у горизонтальній до  $\pm 0,6^\circ$ ;
- ступінь турбулентності потоку 0,5%.

Модель кріпилася за допомогою державки до тензометричного динамометра [15]. Вимірювальна частина динамометра заснована на застосуванні пружних шарнірів і являла собою єдину пружну систему, стійку до вібрацій. Чутливим до навантаження елементом є пружна пластина, що перетворює зусилля в електричні сигнали.

У якості реєстратору застосовувався цифровий вольтметр (рис. 3).

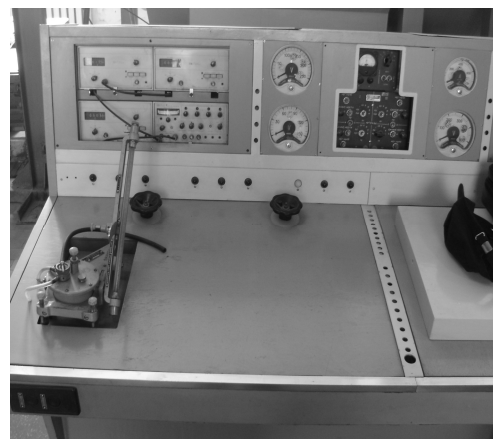


Рис. 3. Пульта керування дослідками

Досліди проводилися згідно методики [15], що прийнята в аеродинамічній лабораторії ОНМУ. У ході проведення експерименту реєструвалися наступні параметри:

- $\rho_w$  - щільність повітря,

$P_w$  - атмосферний тиск,

$T$  - температура,

$\phi$  - відносна вологість повітря.

Перед проведенням дослідів було проведено їхнє планування й рандомізація [16].

Усього було проведено 5 серій дослідів.

Експерименти проводилися в наступній послідовності:

1) модель за допомогою державки кріпилася до динамометра;

2) фіксувалися початкові показання вимірювальних приладів;

3) включалася аеродинамічна труба й поступово підвищувалася  $V$  потоку повітря;

4) при досягненні  $V$  потоку відповідної точки виміру проводився вимір величини повздовжньої складової аеродинамічного опору  $X_{0M}$ ;

5) потім швидкість потоку збільшувалася й виміри повторювалися для наступної  $V$  потоку.

За отриманим значенням визначався безрозмірний аеродинамічний коефіцієнт [13] опору  $C_{x_0}$ :

$$C_{x_0} = (\rho_w V^2 / 2) S / X_0, \quad (8)$$

де  $S$  - перетин міделя моделі,  $\rho_w$  - щільність середовища,  $V$  - швидкість руху моделі відносно потоку ( $Re$ ).

Величина сили опору руху ( $R_{x_{0н}}$ ) БТР-3У, без обліку хвиле утворення, пропорційна характерній площі  $S$ , щільності середовища  $\rho_{води}$  й квадрату

швидкості  $V$  і визначається такою формулою [13]:

$$R_{x_{0н}} = C_x 0,5 (\rho_{води} V_n^2) S. \quad (9)$$

Обробка результатів проведених експериментів [13] проводилася за типовою методикою, яка застосовується в ОНМУ. Середня квадратична похибка виміру коефіцієнта  $C_x$  склала не більше 0,5%.

Результати, що отримані в ході експерименту, наведені у табл. 1 й на рис. 4.

## Висновки

Проведені дослідження дозволили зробити такі висновки:

– досліді, що проведені в аеродинамічній трубці, дозволяють вивчати гідродинамічну взаємодію зануреної частини плаваючої машини й потоку, що набігає, без обліку хвиле утворення;

– режим «автомодельності» для гідродинамічних об'єктів типу БТР лежить у зоні відносних швидкостей потоку  $Re$  від  $12,5 \times 10^5$  до  $18 \times 10^5$ ;

– середні значення коефіцієнту  $C_x$  для ЛБМП, близьких за обводами занурених частин корпусу до БТР-3У, можна приймати рівним 0,94 - 0,95;

– отримані результати дозволяють визначити опір ЛБМП типу БТР-3У;

– викладена в статті методика може бути використана при визначенні сил гідродинамічної природи, що діють на ЛБМП при русі по воді.

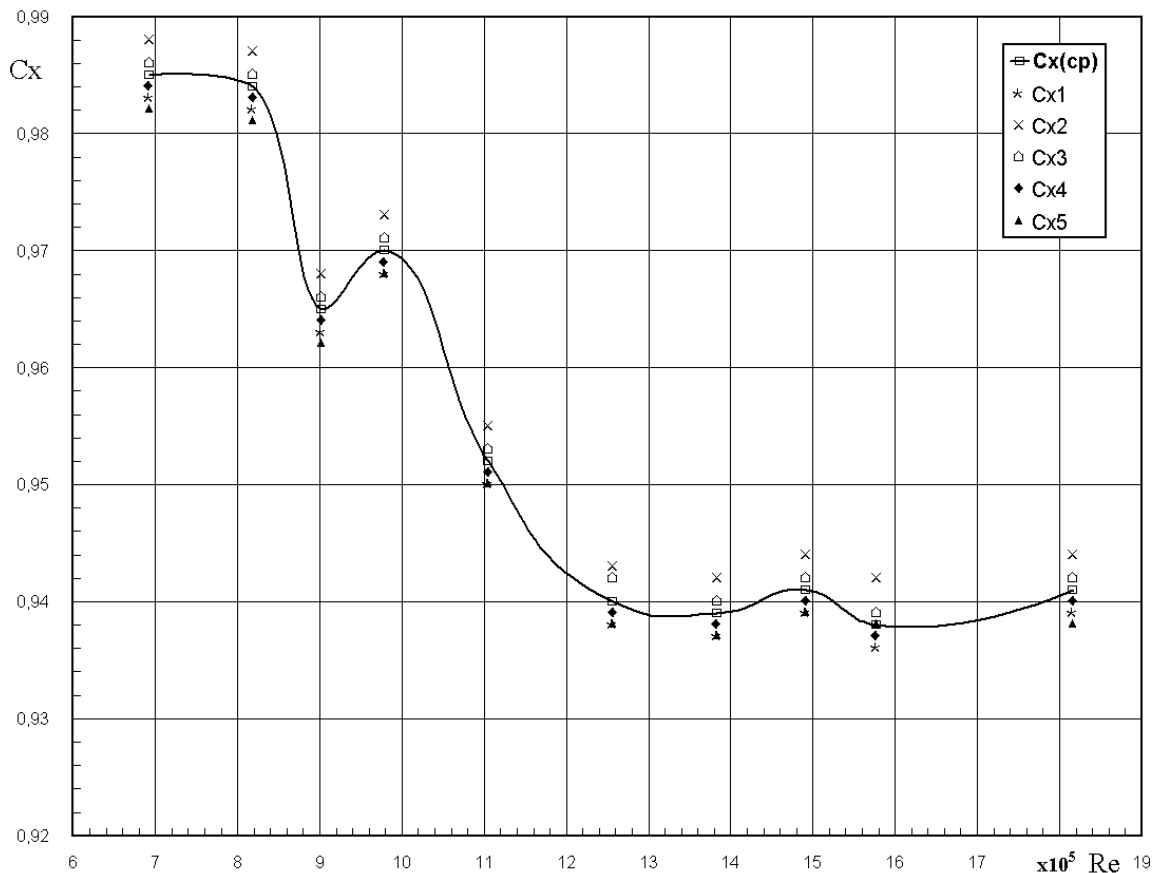


Рис. 4. Зміна величини  $C_x$  залежно від швидкості потоку, що набігає, для підводної частини моделі БТР-3У

Результати проведення дослідів  
по визначенню коефіцієнта опору води ( $C_x$ ) підводної частини БТР-3У

$Re \times 10^5$	$C_{x1}$	$C_{x2}$	$C_{x3}$	$C_{x4}$	$C_{x5}$	$C_{xcp}$
6,922	0,98	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99
8,186	0,98	0,97	0,99	0,98	0,98	0,98
9,021	0,96	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96
9,784	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
11,05	0,95	0,96	0,95	0,97	0,95	0,95
12,57	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,92
13,84	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
14,91	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
15,77	0,94	0,92	0,93	0,93	0,93	0,93
18,17	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94

### Список літератури

1. Крижний А.В. Розвиток і перспективи виробництва в Україні плавних бойових машин / А.В. Крижний, С.В. Бугаєв // Наука й оборона. – 2005. – № 4. – С. 53-56.
2. Современная бронетанковая техника: Справочное пособие. – Минск: Эйлда, 1998. – 193 с.
3. Степанов А.П. История развития бронированных плавающих машин России / А.П. Степанов // Техника и вооружение. – М.: Издатель РОО Техинформ. – Февраль 2000. – С. 1-6.
4. Бугаев С.В. Плавающая машина. Теория и эксперимент / С.В. Бугаев. – Одесса: ОГМУ. 2000. – 322 с.
5. Степанов А.П. Боевые плавающие машины США / А.П. Степанов. – М.: АСТ. Астрель 2001. – 195 с.
6. Бугаев С.В. Розвиток та перспектива виробництва бойових машин, що плавають в Україні / С.В. Бугаєв // Матеріали ІІ НТК Військово-Морських Сил України. – Севастополь : СВМІ, 2000. – С. 38-43.
7. Проспекты новых образцов БТТ. Разработки ХКБМ им. Морозова. – Х. ХКБМ им. Морозова, 1999.
8. Сайт Харьковского конструкторского бюро по машиностроению им. Морозова [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://morozov.com.ua/rus/body/btr4.php>.
9. Информационный сайт «Голос столицы» [Электронный ресурс]. – Режим доступа к материалам сайта: [newsradio.com.ua/rus/2013\\_02\\_07/Ukraine-otpraviv-v-Irak-eshhe-40-BTR-4](http://newsradio.com.ua/rus/2013_02_07/Ukraine-otpraviv-v-Irak-eshhe-40-BTR-4).

10. Борохвостов В. Украина и Россия на мировых рынках бронетанкового вооружения / В. Борохвостов // Арсенал XXI века. – 2001. – № 8. – С. 12-20.

11. Евграфов А.Н. Аэродинамика автомобиля: учебное пособие / А.Н. Евграфов. – М.: МГИУ, 2010. – 356 с.

12. Федяевский К.К. Гидромеханика / К.К. Федяевский, Я.И. Войткунский, Ю.И. Фаддеев. – Л., Судостроение, 1982. – 245 с.

13. Трецевский В.Н. Аэродинамический эксперимент в судостроении / В.Н. Трецевский, Л.Д. Волков, А.И. Короткин. – Л.: Судостроение, 1976. – 145 с.

14. Численное моделирование процесса обтекания автомобиля / И.Э. Кульпина, С.М. Перминов, В.О. Писковский, А.Г. Соколов // Математическое моделирование. – 1994. – № 1. – С. 54-68.

15. Беляев Г.В. Цифровая система «Поток» для исследования моделей судов / Г.В. Беляев, Г.И. Качулин, Ю.Ф. Мотивенко. – Л.: Судостроение, 1970. – 114 с.

16. Маркова Е.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных исследований / Е.В. Маркова, Ю.П. Адлер, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1986. – 280 с.

Надійшла до редколегії 16.10.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.М. Фоменко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОГРУЖЕННОЙ ЧАСТИ БТР-3У ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ ПО ВОДЕ

С.В. Бугаев

В статье приведенные результаты определения величины сопротивления погруженной в воду части модели легкобронированной плавающей машины БТР-3У, которая вызвана ее движением по воде. Результаты были получены при выполнении модельных опытов в аэродинамической трубе Одесского национального морского университета. Полученные данные могут использоваться при расчете ходовых качеств плавающих машин.

**Ключевые слова:** легкобронированная машина, сопротивление воды, аэродинамическая труба, модельные испытания.

### DETERMINATION OF SIZE OF RESISTANCE THE SUBMERGED PART OF BTR-3U AT HIS MOTION ON WATER

S.V. Bugaev

In the article the brought results over of determination of size of resistance of water to the model easy armored floating machine BTR-3U submersed part that is caused by her motion. Results driven are to work, were got at implementation of model experiments in the wind-channel of the Odessa national marine university. The obtained data can be used for the calculation of working internalss of floating machines.

**Keywords:** easy armored floating machine, resistance of water, wind-channel, model tests.