

---

УДК 629.12.532.59

С.В. Бугаев

Военная академия, Одесса

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЛЕГКОБРОНИРОВАННОЙ ПЛАВАЮЩЕЙ МАШИНЫ НА ВОЛНЕНИИ

*Приведены результаты модельных испытаний легкобронированной плавающей машины (М 1:7) на волнении. Описано её поведение при взаимодействии со встречным волнением. Даны рекомендации по улучшению ходовых качеств машины на волнении.*

**Ключевые слова:** легкобронированная плавающая машина, волнение, ходовые качества, буксировочные испытания, динамическая тарировка, сопротивление воды, модель.

### Введение

**Постановка проблемы.** Придание водоходных качеств легкобронированным плавающим машинам (ЛБПМ) – одно из направлений повышения её проходимости и подвижности. Передвижение по воде для этого класса машин носит периодический характер, в основном только в том случае, когда переправа другими способами (по мостам, по броду)

исключается. Повышение тактико-технических характеристик ЛБПМ приводит к заметному увеличению массы машин [1], а следовательно – к снижению величины надводного борта и запаса плавучести машины. Это приводит к ухудшению водоходных качеств ЛБПМ, повышению риска затопления машины, ограничивает условия её применения [1]. Поэтому еще на этапе проектирования ЛБПМ необходимо знать, как машина будет себя вести на пла-

ву, возможно ли обеспечить требуемую скорость движения и оценить безопасность эксплуатации. Решение поставленных научных задач позволит исключить грубые ошибки при проектировании ЛБПМ, оценить предельно возможную (по условиям безопасности) эксплуатационную массу машины и разработать необходимые конструктивные мероприятия по улучшению водоходных качеств.

Развитие численных методов расчета аэрогидродинамического взаимодействия объекта и среды [2], несмотря на бесспорный прогресс в этой области позволяют для объектов со сложной геометрической формой, к которым относится ЛБПМ, получать только качественную картину обтекания. Это связано с тем, что физическая картина обтекания каждого элемента корпуса и ходовой части различна. Наблюдаются зоны: застоя, обратного тока, отрыва пограничного слоя, дифракции и интерференции элементов, гидродинамической тени, поперечных и продольных токов жидкости и т.д. Кроме того, в связи с вязкостью воды при увеличении скорости эти участки меняют свою конфигурацию, вид обтекания на них может существенно изменяться. Все это учесть при численном моделировании проблематично. Поэтому исследования по оценке водоходных качеств плавающих машин (ПМ), как правило, проводятся в аэрогидродинамических лабораториях, в опытовом бассейне или гидродинамическом лотке.

**Анализ литературы.** Наиболее полно вопросы расчета водоходных качеств ПМ излагаются в работах [1, 3 – 5]. Так, в работах [3 – 5] приводятся результаты модельных и натурных исследований ряда ПМ. Получены зависимости влияния носовой оконечности машины, положения ходовой части и ниш корпуса на её сопротивление движению. В работе [1] на основании проведенных модельных экспериментов ЛБПМ предложены многофакторные математические модели для расчета скорости движения и ходового дифферента машины в зависимости от начального дифферента, высоты надводного борта, полноты носовых обводов корпуса машины. Автор работы [1] выдвинута гипотеза, что погруженная часть корпуса ПМ при движении по воде ведет себя, как крыло малого удлинения и приводит к образованию отрицательного дифференцирующего момента, что приводит к погружению в воду носовой части машины и увеличению её сопротивления движению.

Одним из наиболее неизученных вопросов в общей теории водоходных качеств ПМ является вопрос о поведении низкорортной ЛБПМ на встречном волнении. Он в настоящее время недостаточно изучен. Изменение сопротивления и скорости движения машины, влияние продольной качки на ходовой дифферент. Для получения данных о поведении ЛБПМ на волнении было проведено исследование.

**Цель работы** заключается в исследовании влияния на водоходные качества ЛБПМ встречного волнения.

Исходя из поставленной цели, были определены следующие **задачи исследования**:

- 1) изготовить модель ЛБПМ, предназначенную для проведения буксировочных испытаний в опытовом бассейне;
- 2) провести с испытания ходовых качеств модели на встречном волнении;
- 3) полученные результаты проанализировать и по их результатам предложить мероприятия по улучшению водоходных качеств ЛБПМ.

## Изложение основного материала

### 1. Модель ЛБПМ и экспериментальная установка

В качестве объекта для исследования водоходных качеств ЛБПМ, принималась её модель, выполненная в масштабе 1:7.

Модель была изготовлена в модельной мастерской опытового бассейна Одесского национального морского университета (ОНМУ) из водостойкой фанеры и плотного пенопласта по чертежам реальной ЛБПМ, имеющей следующие размеры: длина  $L=7,29$  м; ширина  $B=3,22$  м; средняя осадка  $T=1,79$  м; площадь наибольшего поперечного сечения машины  $S=4,7$  м<sup>2</sup>; водоизмещение машины  $D=19$  т.

Для придания модели водостойкости она со всех сторон покрывалась тонким слоем сплава парафина с воском.

Наружная поверхность корпуса ходовой части модели обрабатывалась специальной шлифовальной машиной.

После обработки модели элементы ходовой части крепились к корпусу с помощью болтов. Затем модель взвешивалась и проводилась динамическая тарировка модели, заключающаяся в определении момента инерции масс относительно поперечной оси ОУ.

Путем перемещения твердого балласта внутри модели удалось добиться собственного момента инерции, равного:

$$Y_{инм} = 0,315 \text{ кг/м}^2, \quad (1)$$

что соответствует собственному моменту инерции для натурной машины:

$$Y_{инн} = 5290 \text{ кг/м}^2. \quad (2)$$

Период продольных колебаний модели на спокойной воде составил:

$$\tau = 0,91 \text{ с.} \quad (3)$$

Эксперименты проводились в опытовом бассейне ОНМУ. Опытный бассейн – гравитационного типа (движение модели осуществляется за счет груза, опускающегося в шахту). Длина бассейна – 36 м, ширина – 6 м, глубина – 2,25 м. Он оборудован бук-

сировочной системой, разгонным устройством, устройством для записи скорости движения модели и др. необходимым оборудованием.

Измерение скорости движения модели производилось фотоэлектронным устройством, передающим сигналы на ЭВМ в автоматическом режиме. Погрешность измерительного комплекса согласно данным метрологического контроля находилась в пределах  $\pm 0.01\%$ .

## 2. Методика модельного эксперимента

Экспериментальное моделирование основано на законе динамического подобия потоков жидкости, для обеспечения которого, согласно теории подобия и размерностей, необходимо соблюдение равенств критериев подобия у модели и натурального объекта, основные из них следующие:

– число Эйлера:

$$Eu = v / (\rho \cdot 0,5v^2); \quad (3)$$

– число Фруда:

$$Fr = v / (gL)^{1/2}; \quad (4)$$

– число Рейнольдса:

$$Re = vL / \nu; \quad (5)$$

– число Струхала:

$$Sh = vt / L. \quad (6)$$

где  $v$  – характерная скорость потока;  $L$  – характерный линейный размер;  $t$  – характерный промежуток времени;  $\rho$  – массовая плотность жидкости;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости;  $g$  – ускорение свободного падения.

Скорость движения ЛБПМ не сопровождается кавитацией, следовательно, числа Эйлера у машины и её модели будут равны. Число Струхала учитывается только в случае исследования неустановившегося движения. Следовательно, при моделировании прямолинейного равномерного движения будут значимыми только критерии равенства чисел  $Fr$  (4) и  $Re$  (5), т.е. для натурной и модели должны соблюдаться равенства:

$$V_n(gL_n)^{0,5} = V_m(gL_m)^{0,5}; \quad (7)$$

$$(V_n L_n) / \nu_n = (V_m L_m) / \nu_m, \quad (8)$$

где индексом  $N$  обозначены характеристики натурной машины, а индексом  $M$  – характеристики, относящиеся к модели.

Одновременное соблюдение равенств чисел  $Fr$  (7) и  $Re$  (8) при испытании моделей практически [1] неосуществимо. При моделировании ходкости объектов в опытовых бассейнах в основу методики модельного эксперимента положена гипотеза о том, что полное сопротивление движения ( $R$ ) для натурального объекта (модели) состоит из двух частей: одна зависит только от весомости жидкости ( $R_1$ ), и вторая, зависящая только от её вязкости ( $R_2$ ):

$$R = R_1 [V / (gL)^{0,5} + R_2 (VL/\nu)]. \quad (9)$$

Пользуясь этой гипотезой, можно проводить испытания так, чтобы динамическое подобие было соблюдено только в отношении одной части сопротивления. При этом другая часть сопротивления (сопротивление трению погруженной части) для модели и для натурального объекта может быть определена расчетным путем.

Метод определения сопротивления воды движению плавающего объекта на основании результатов буксировочных испытаний геометрически подобной модели в опытовых бассейнах основан на предположении о возможности разделения полного сопротивления  $R$  на две независимые составляющие: сопротивление трения и остаточное сопротивление. Сопротивление трения  $R_F$  предполагается равным сопротивлению трения эквивалентной гидродинамически гладкой пластины  $R_{F0}$ , при турбулентном режиме течения в пограничном слое. Величина его оценивается расчетом с помощью зависимостей, основанных на теории пограничного слоя. Остаточное сопротивление  $R_R$  определяется по данным модельных буксировочных испытаний:

$$R_R = R - R_{F0}. \quad (10)$$

При равных числах Фруда коэффициенты остаточного сопротивления модели и натурной плавающей машины равны между собой:

$$C_{Rm} = C_{Rn} \text{ при } Fr_m = Fr_n; \quad (11)$$

$$R_{Rm} = R_{Rn} / k^3. \quad (12)$$

## 3. Эксперимент и его результаты

Буксировочные испытания проводились по методике, применяемой в опытовом бассейне ОНМУ, и выполнялись в такой последовательности:

– Модель устанавливалась в исходное положение в конце бассейна, приводились в готовность разгонное устройство и устройство для записи скоростей, устанавливались буксирующий и разгонный грузы.

– Затем выключался пусковой тормоз, что приводило в движение модель ЛБПМ.

– После отключения разгонного устройства автоматически включалась запись скорости движения модели.

– Торможение и остановка модели после прохождения мерного участка осуществлялось вручную.

– Возвращение модели в исходное положение производилось с помощью специальной электролебдки или вручную.

– Регистрирующее устройство (реализованное на ЭВМ) записывало 20 значений показателей скорости движения на рабочем участке пробега. При отклонении замеров скорости движения более  $\pm 0,1\%$ , изменялась величина разгонного груза: путем его увеличения – если скорость возрастала, и уменьшения – если скорость уменьшалась. Опыты проводились до совпадения значений с требуемой точностью. Это значение скорости и принималось в

качестве соответствующей установленному буксировочному грузу. Затем изменялся вес буксировочного груза, и опыты производились в том же порядке для следующей точки замера  $\alpha$  (рис. 1).

Исследование качки и посадки модели на ходу были выполнены на встречном волнении в наиболее опасных условиях, близких к резонансным.

Период собственных колебаний модели на спокойной воде составил  $\tau_m=0,91$ с (около  $\tau_n=2,4$ с для ЛБПМ). Длина и высота волны в этом случае должны быть равными:  $\lambda_m=2,66$  м,  $h_m=0,075$  м и период  $\tau=1,31$  с, что соответствует длине  $\lambda_n=18,6$  м и высоте  $h_n=0,53$  м ЛБПМ. Начальная посадка машины во всех опытах принималась одинаковой. Высота надводного борта принималась 35 мм (для ЛБПМ составляет 245 мм).

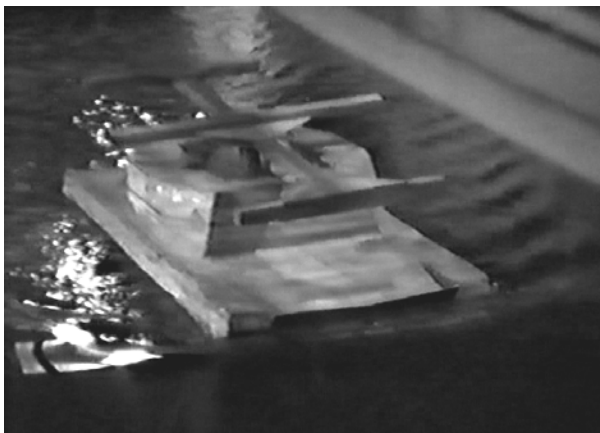


Рис. 1/ Модель ЛБПМ во время испытания

Пересчет полученных результатов буксировочного испытания модели на натурную машину производился по стандартной методике, применяемой в ОНМУ [1], результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Пересчет результатов буксировочных испытаний модели ЛБПМ на встречном регулярном волнении на натуре  $D=55,4$  кг,  $\lambda=2,66$ ,  $h=0,075$  м

| $R_m$ (кг) | $V_m$ (м/с) | $R_m(H)$ | $Fr$  | $V_n$ (м/с) | $V_m$ (км/ч) | $R_n$ (кН) | $N_6$ (кВт) |
|------------|-------------|----------|-------|-------------|--------------|------------|-------------|
| 0,750      | 0,440       | 4,32     | 0,136 | 0,164       | 4,19         | 1,48       | 1,72        |
| 1,250      | 0,585       | 12,26    | 0,180 | 1,548       | 5,57         | 4,21       | 6,51        |
| 1,750      | 0,702       | 17,17    | 0,216 | 1,857       | 6,69         | 5,89       | 10,94       |
| 2,250      | 0,764       | 22,07    | 0,236 | 2,021       | 7,28         | 7,57       | 15,30       |
| 2,750      | 0,819       | 26,98    | 0,253 | 2,167       | 7,80         | 9,25       | 20,05       |

Визуальное наблюдение показало следующее. Резонанс продольной качки наступал при скорости модели  $v=0,66$  м/с.

По мере нарастания продольной качки на ходу заметно уменьшалось "зарывание" модели, сопро-

тивление воды при этом тоже уменьшалось, скорость увеличивалась. На рис. 2 приведены результаты буксировочных испытаний (кривая  $R_m(H)_w$ ). Для сравнения на этом рисунке показаны результаты буксировочных испытаний модели на покойной воде (кривая  $R_m(H)$ ).

При встречном движении модели по отношению к профилю волны кажущаяся частота совпадала с частотой собственных колебаний при скорости  $v_m=0,66$  м/с.

В этих условиях средние увеличения осадки модели составили: в носовой части  $\delta_{ТН}=46$  мм, в кормовой части:  $\delta_{ТК}=4$  мм, средний дифферент  $\Delta_{ср.}=42$  мм, средний угол дифферента  $\phi_{ср.}=2,3^\circ$ , средняя амплитуда килевой качки  $\phi_0=1,0^\circ$ .

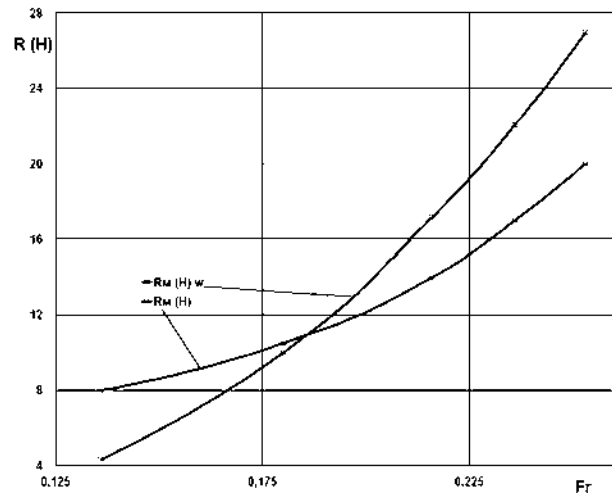


Рис. 2. Изменение величины буксировочного сопротивления модели ЛБПМ в зависимости от скорости движения:  $R_m(H)$  – спокойная вода,  $R_m(H)_w$  – в условиях встречного волнения.

При небольшой амплитуде качки башня испытывает интенсивные удары волн.

## Выводы

Проведенные экспериментальные исследования модели ЛБПМ на волнении позволили сделать выводы:

1. При движении на встречном регулярном волнении машина несколько увеличивает скорость хода по сравнению с результатами испытаний на спокойной воде, что связано с уменьшением в этих условиях среднего ходового дифферента.

2. В условиях резонанса килевой качки амплитуда невелика, но машина испытывает интенсивное заливание носовой части и удары волн о башню.

3. Для уменьшения заливания носовой части и башни ЛБПМ при движении её на волнении необходимо увеличить площадь, конфигурацию и угол наклона волноотражающего щитка, а также выбирать скорость движения маши по воде вне зоны резонансных явлений.

## Список литературы

1. Бугаев С.В. Плавающая машина. Теория и эксперимент / С.В. Бугаев. – Одесса: ОНМУ, 2000. – 322 с.
2. Загузов И.С. Математическое моделирование течений вязкой жидкости в близи твердой поверхности / И.С. Загузов. – Самара: «Самарский университет», 1999. – 91 с.
3. Аксенов П.В. Плавающие колесные и гусеничные машины. Экз. № 4273. / П.В. Аксенов, Ю.А. Кононович. – М. : Военное издательство МО СССР, 1963. – 269 с.
4. Степанов А.П. Конструкция и расчет плавающих машин / А.П. Степанов. – М. : Машиностроение, 1983. – 196 с.
5. Степанов А.П. Мореходность амфибийных машин / А.П. Степанов. – М. : МАДИ, 1998. – 103с.

Поступила в редколлегию 23.07.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.Н. Фоменко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВОДЖЕННЯ ЛЕГКОБРОНЬОВАНОЇ ПЛАВАЮЧОЇ МАШИНИ НА ХВИЛЮВАННІ

С.В. Бугаєв

Наведено результати модельних випробувань легкоброньованої плаваючої машини (М 1:7) на хвилюванні. Описане її поведіння при взаємодії із зустрічним хвилюванням. Дано рекомендації з поліпшення ходових якостей машини на хвилюванні.

**Ключові слова:** легкоброньована плаваюча машина, хвилювання, ходові якості, буксирні випробування, динамічна таріровка, опір води, модель.

## RESEARCH OF CONDUCT EASY ARMoured FLOATING MACHINE ON AGITATION OF WATER

S.V. Bugaev

Resulted results of model tests of easy armored of floating machine (M 1:7) on agitation of water. Results are resulted describing co-operation machines that floats with a water surface. Developed recommendation on the increase of nautical qualities of machine that floats on a wave.

**Keywords:** easy armored floating machine, agitation, workings qualities of towing tests dynamic resistance of water model.