

УДК 629.3.015.4

Метод экспериментального определения гидродинамических характеристик транспортно-технологической машины

Магдина Елизавета Ростиславовна,
ученый секретарь

Elisluk97@mail.ru
SPIN-код: 1603-6470

Кожуховский Алексей Олегович,
аспирант

frapsmaster97@gmail.com

Добромиров Виктор Николаевич,
профессор кафедры, д-р техн. наук,
профессор

viktor.dobromirov@mail.ru

Кафедра наземных транспортно-технологических машин,
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье представлен метод экспериментального определения гидродинамических характеристик транспортно-технологических машин (ТТМ) — коэффициентов лобового (C_x) и бокового (C_y) сопротивления, а также коэффициента момента рысканья (C_{mz}). Метод основан на проведении аэродинамических испытаний масштабной модели ТТМ в аэродинамической трубе с последующим пересчетом результатов на натурный образец с использованием критериев подобия. Приведены планирование эксперимента, методика проведения испытаний, статистическая обработка результатов и их сравнение с данными численного моделирования. Показано, что расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 11 %, что подтверждает достоверность предложенного метода и его применимость для оценки бродоходимости ТТМ.

Ключевые слова: транспортно-технологическая машина, бродоходимость, гидродинамические характеристики, аэродинамический эксперимент, масштабная модель, коэффициент сопротивления, момент рысканья

Method for experimentally determining the hydrodynamic characteristics of a transport and technological machine

Magdina Elizaveta Rostislavovna,
Academic Secretary

Elisluk97@mail.ru
SPIN-code: 1603-6470

Kozhuhovskii Aleksey Olegovich,
Graduate Student

frapsmaster97@gmail.com

Dobromirov Viktor Nikolaevich,
Professor of the Department,
Doctor of Technical Sciences, Professor

viktor.dobromirov@mail.ru

Department of Land Transport and Technological Machines,
St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia

Abstract. The article presents a method for experimentally determining the hydrodynamic characteristics of transport and technological machines (hereinafter referred to as TTM), such as the coefficients of frontal (C_x) and lateral (C_y) resistance, as well as the coefficient of yaw moment (C_{mz}). The method is based on conducting aerodynamic tests of a scale model of a TTM in a wind tunnel, followed by the conversion of the results to a full-scale model using similarity criteria. The article provides an overview of the experimental planning, testing methodology, statistical analysis of the results, and their comparison with numerical modeling data. It has been shown that the discrepancy between the calculated and experimental data does not exceed 11%, which confirms the reliability of the proposed method and its applicability for assessing the TTM's ability to cross water obstacles.

Keywords: transport and technological machine, cross-country ability, hydrodynamic characteristics, aerodynamic experiment, scale model, drag coefficient, yaw moment

Введение. Эффективность применения ТТМ в зонах затопления при проведении аварийно-спасательных и восстановительных работ в значительной степени определяется их бродоходимостью — способностью преодолевать водные преграды вброд по донному основанию. Ключевыми факторами, ограничивающими бродоходимость, являются гидродинамические силы и моменты, действующие на корпус машины со стороны водной среды: сила лобового и бокового сопротивления, выталкивающая сила и момент рысканья [1, 2].

Проведение натурных экспериментов по определению этих характеристик сопряжено со значительными трудностями, высокой стоимостью и рисками повреждения техники. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов определения гидродинамических характеристик ТТМ на основе испытаний масштабных моделей [3].

Целью данного исследования являлась разработка и апробация метода экспериментального определения коэффициентов лобового (C_x) и бокового (C_y) гидродинамического сопротивления, а также коэффициента момента рысканья (C_{mz}) для ТТМ на основе аэродинамических испытаний масштабной модели.

Полученные данные позволят уточнить методику расчетной оценки бродоходимости ТТМ [4].

Методика экспериментального исследования. *Объект исследования и оборудование.* В качестве объекта исследований была выбрана масштабная модель (масштаб 1:10) полноприводного экскаватора-погрузчика JCB 4CX — репрезентативного образца ТТМ, широко применяемого в аварийно-спасательных операциях. Модель изготовлена из дерева с послойной конструкцией, позволяющей имитировать четыре уровня погружения в воду: 0,6, 0,9, 1,2 и 1,5 м (в натурном масштабе). Исследования проводятся для каждой конфигурации модели при последовательном наращивании ее слоев и установлении исследуемых скоростей воздушного потока [5]. Геометрия модели была упрощена для минимизации паразитных аэродинамических возмущений (рис. 1).



Рис. 1. Физическая модель экскаватора-погрузчика в масштабе 1:10

Эксперименты проводились на аэродинамической трубе (далее — АДТ) замкнутого цикла с открытой рабочей частью. Измерительный комплекс включал:

- четырехкомпонентный тензодинамометр для измерения сил и моментов;
- поворотный стол с шагом 30° для изменения угла набегания потока (β) в диапазоне от 0° до 180° , который также выполнял функцию нижнего аэродинамического экрана, моделирующего свободную поверхность;
- систему сбора и обработки данных на основе тензометрических датчиков;
- трубку Пито — Прандтля для контроля скорости воздушного потока.

Модель закреплялась в перевернутом положении над экраном для обеспечения корректного обтекания (рис. 2).



Рис. 2. Установка модели на поворотном круге в рабочей зоне АДТ

Критерии подобия и условия испытаний. Для обеспечения достоверности экстраполяции результатов с модели на натуру необходимо соблюдение критериев подобия. Было обеспечено геометрическое подобие с коэффициентом $K_L = 0,1$.

Условия испытаний:

Скорость обдува: 24 м/с. Данная скорость была выбрана из условия обеспечения турбулентного режима обтекания ($Re^M \approx 1,1 \cdot 10^6$) и технических возможностей АДТ. Несмотря на частичное нарушение полного подобия по Рейнольдсу с натурой ($Re^H \approx 8,8 \cdot 10^6$), оба режима являются турбулентными, а для плохообтекаемых тел коэффициенты сопротивления слабо зависят от Re в этой области [3].

Угол набегания потока (β): варьировался с шагом 30° ($0^\circ, 30^\circ, \dots, 180^\circ$).

Глубина погружения ($h_{бр}$): моделировалась четырьмя уровнями высоты модели (0,06 м, 0,09 м, 0,12 м, 0,15 м в масштабе модели, что соответствует 0,6 м, 0,9 м, 1,2 м, 1,5 м для натуры).

Был проведен полный факторный эксперимент, общее количество опытов составило 4 (уровня погружения) $\times 7$ (углов атаки) = 28 . Для обеспечения доверительной вероятности 90% каждый опыт повторялся 4 раза.

Методика обработки данных. Измеренные в поточной системе координат АДТ продольная (X) и боковая (Y) силы, а также момент рысканья (M_z) пересчитывались в связанную с моделью систему координат по формулам (1) и (2) и приводились к безразмерному виду — коэффициентам C_x, C_y, C_{mz} — по формулам (3)–(5):

$$F_{\text{лоб}} = X \cdot \cos\beta + Y \cdot \sin\beta, \quad (1)$$

$$F_{\text{бок}} = -X \cdot \sin\beta + Y \cdot \cos\beta, \quad (2)$$

$$C_x = \frac{X \cdot k_x}{0,5 \cdot \rho_{\text{возд}} V_{\text{возд}}^2 A_M}, \quad (3)$$

$$C_y = \frac{Y \cdot k_y}{0,5 \cdot \rho_{\text{возд}} V_{\text{возд}}^2 A_M}, \quad (4)$$

$$C_{mz} = \frac{M \cdot k_m}{0,5 \cdot \rho_{\text{возд}} V_{\text{возд}}^2 A_M L_M}, \quad (5)$$

где X, Y, M — соответственно продольная составляющая силы давления воздушного потока, боковая составляющая и момент силы относительно центра тяжести, определенные экспериментально; k_x, k_y, k_m — калибровочные коэффициенты (устанавливаются в процессе наладки измерительной аппаратуры); $\rho_{\text{возд}}$ — плотность воздуха, кг/м^3 ; $V_{\text{возд}}$ — скорость набегающего потока, м/с ; A_M — площадь мишени (площадь проекции на плоскость, перпендикулярную оси потока), м^2 ; L_M — длина (ширина) модели в зависимости от положения обтекания, м . Для установления зависимостей коэффициентов от факторов (β и $h_{бр}$) использовалась полиномиальная регрессионная модель 2-го порядка (6)–(7):

$$Y_i = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2; \quad (6)$$

$$Y_1, Y_2, Y_3 = f(X_1, X_2), \quad (7)$$

где Y_1 — коэффициент лобовой составляющей силы сопротивления (C_x); Y_2 — коэффициент боковой составляющей силы сопротивления (C_y); Y_3 — коэффициент момента (C_{mz}).

Результаты и их обсуждение. Статистический анализ результатов. Статистическая обработка данных подтвердила высокую значимость обоих факторов — угла набегания потока (β) и глубины погружения ($h_{бр}$) — а также их взаимодействия ($p\text{-value} < 0,001$ для всех случаев, табл. 1).

Таблица 1

Дисперсионный анализ для коэффициента C_x

Источник вариации	Сумма квадратов (SS)	Степени свободы (df)	F-значение	p-value
Угол набегания (β)	4,217	6	185,2	< 0,001
Глубина ($h_{бр}$)	1,892	3	166,1	< 0,001
Взаимодействие ($\beta \times h_{бр}$)	0,984	18	14,4	< 0,001
Остаток	0,045	–	–	–

Были получены регрессионные уравнения 2-го порядка с высокими коэффициентами детерминации (8-10):

$$C_x = 0,112 + 0,623 \cdot x_1 - 0,0045 \cdot x_2 - 0,215 \cdot x_1^2 - 0,00001 \cdot x_2^2 - 0,001 \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (8)$$

$$C_y = -0,152 + 1,876 \cdot x_1 + 0,023 \cdot x_2 - 0,642 \cdot x_1^2 - 0,0002 \cdot x_2^2 + 0,005 \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (9)$$

$$C_{mz} = -0,85 + 3,45 \cdot x_1 + 0,18 \cdot x_2 - 1,12 \cdot x_1^2 - 0,002 \cdot x_2^2 - 0,03 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (10)$$

Для C_x : $R^2 = 0,993$.

Для C_y : $R^2 = 0,996$.

Для C_{mz} : $R^2 = 0,988$.

Это свидетельствует о том, что модели адекватно описывают экспериментальные данные.

Определение коэффициентов сопротивления. В табл. 2 представлены экспериментальные значения коэффициентов C_x и C_y для ключевых углов набегания потока (0° и 90°) при различных глубинах погружения.

Таблица 2

Коэффициенты лобового сопротивления C_x (при $\beta = 0^\circ$)
и бокового сопротивления C_y (при $\beta = 90^\circ$)

Высота модели, мм	Глубина брода $h_{бр}$, м	C_x	C_y
60	0,6	0,33	0,43
90	0,9	0,47	0,76
120	1,2	0,68	1,04
150	1,5	0,91	1,35

Как и следовало ожидать, с увеличением глубины погружения и, соответственно, смоченной площади корпуса, значения коэффициентов C_x и C_y монотонно возрастают.

Влияние угла набегания потока. На рис. 3–6 приведены зависимости коэффициентов C_x , C_y и C_{mz} от угла набегания потока β для глубины погружения 0,6 м.

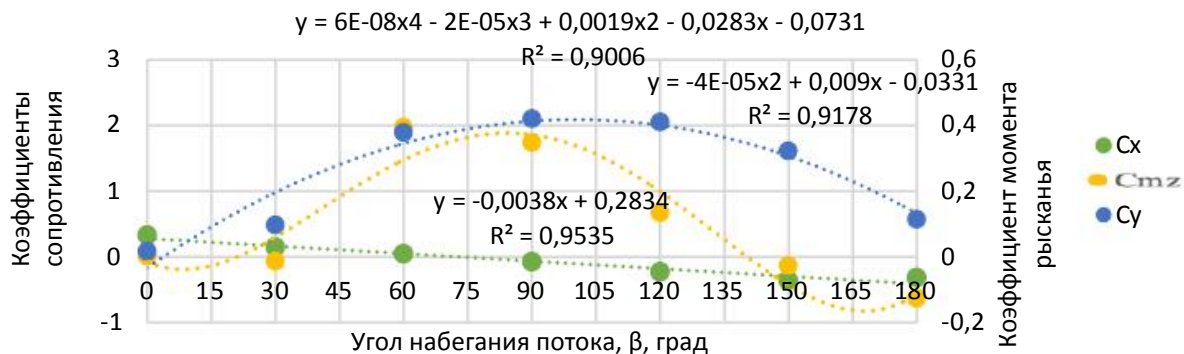


Рис. 3. Зависимость лобового, бокового коэффициентов сопротивления и коэффициента момента рыскания от угла набегавшего потока для глубины водного потока 0,6 м

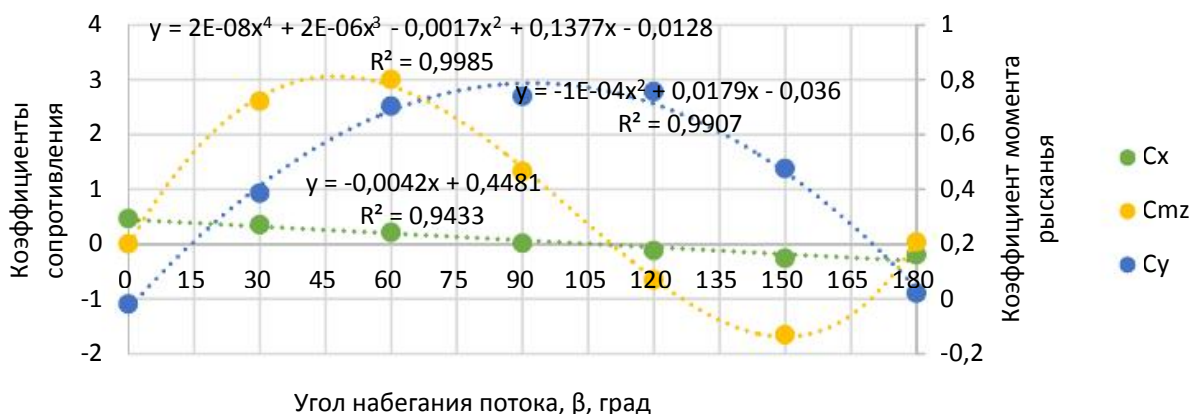


Рис. 4. Зависимость лобового и бокового коэффициентов сопротивления, коэффициента момента рыскания от угла набегавшего потока для глубины водного потока 0,9 м

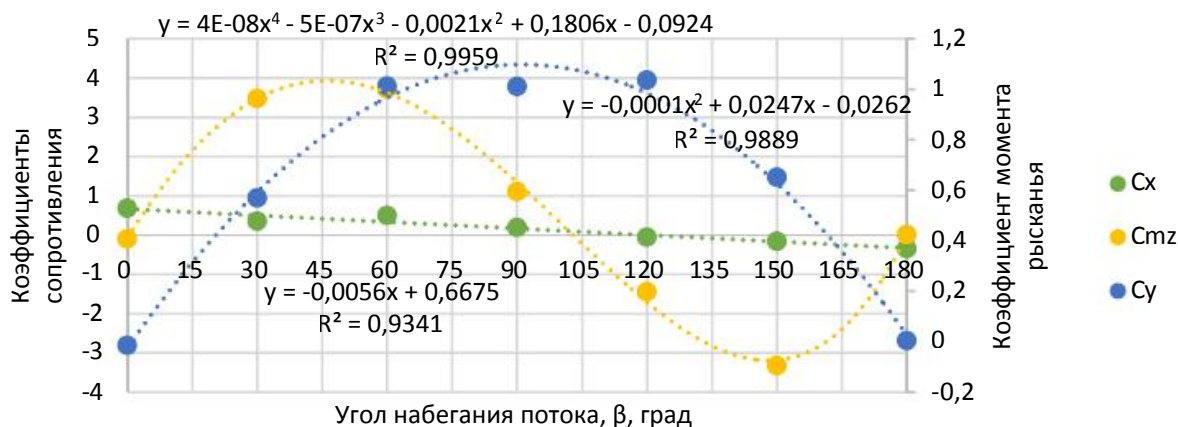


Рис. 5. Зависимость лобового и бокового коэффициентов сопротивления, коэффициента момента рыскания от угла набегавшего потока для глубины водного потока 1,2 м

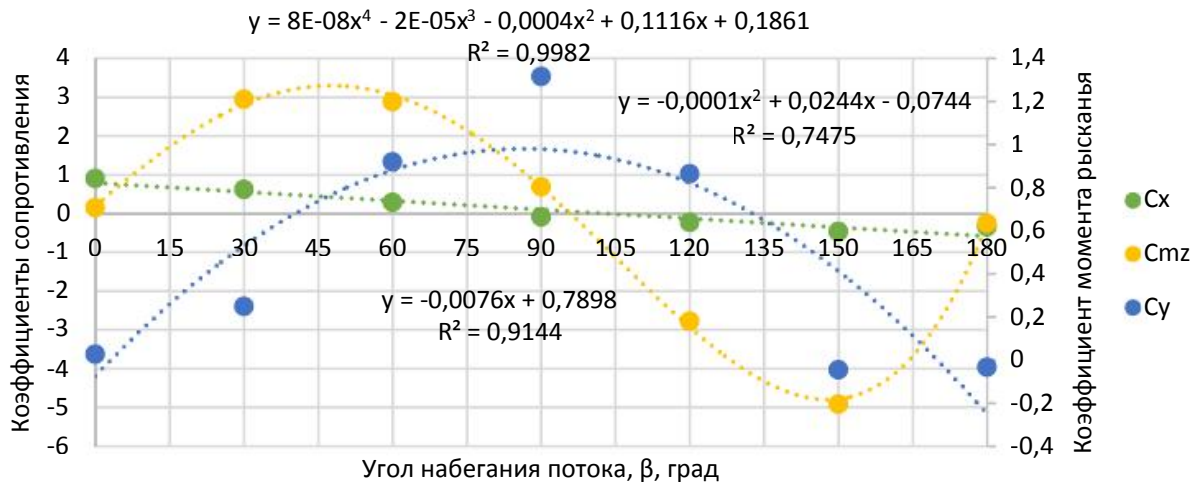


Рис. 6. Зависимость лобового и бокового коэффициентов сопротивления, коэффициента момента рыскания от угла набегающего потока для глубины водного потока 1,5 м

Анализ графиков позволяет выявить следующие закономерности:

C_x : Максимален при $\beta = 0^\circ$ и 180° (продольное обтекание) и минимален при $\beta \approx 90^\circ$.

C_y : Принимает близкие к нулю значения при $\beta = 0^\circ$ и 180° и достигает максимума при $\beta = 90^\circ$ (поперечное обтекание).

C_{mz} : Достигает экстремальных значений в диапазонах $\beta = 30^\circ \dots 60^\circ$ и $\beta = 120^\circ \dots 150^\circ$, что является критичным с точки зрения потери курсовой устойчивости ТТМ при движении в условиях бокового течения.

Качественная картина сохраняется для всех исследованных глубин погружения.

Сравнение с результатами численного моделирования. Для валидации предложенного метода было проведено сравнение экспериментальных данных с результатами CFD-моделирования (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение коэффициента C_x и C_y

$h_{бр}, \text{ м}$	$C_{x \text{ расч}}$	$C_{x \text{ эксп}}$	Отклонение, $\delta\%$	$C_{y \text{ расч}}$	$C_{y \text{ эксп}}$	Отклонение, $\delta\%$
0,6	0,35	0,33	5,2	0,42	0,43	1,6
0,9	0,52	0,47	10,8	0,74	0,76	2,0
1,2	0,64	0,68	5,9	1,01	1,04	2,6
1,5	0,86	0,91	5,0	1,32	1,35	2,2

Расхождения между расчетными и экспериментальными значениями не превышают 11 % для C_x и 2,6% для C_y , что свидетельствует о хорошей схожести результатов и подтверждает достоверность как экспериментального, так и численного методов.

Заключение. Разработан и апробирован метод экспериментального определения гидродинамических характеристик ТТМ (C_x , C_y , C_{mz}) на основе

аэродинамических испытаний масштабной модели. Метод позволяет с высокой достоверностью оценивать параметры, критически важные для прогнозирования бродоходимости.

Установлены количественные зависимости коэффициентов сопротивления и момента рысканья от глубины погружения и угла набегания водного потока. Показано, что максимальный опрокидывающий момент возникает при углах набегания потока, отличных от 0° и 90° , что необходимо учитывать при оценке устойчивости ТТМ.

Проведена валидация метода путем сравнения с результатами CFD-моделирования. Установлено, что расхождения не превышают 11 %, что подтверждает адекватность и надежность предложенного подхода.

Полученные результаты и разработанный метод могут быть использованы для обоснования требований к бродоходимости ТТМ, разработки рекомендаций по их безопасной эксплуатации в условиях затопления, а также для верификации математических и имитационных моделей.

Список источников

- [1] Аверичкин П.А., Дорошенко В.В. Перспективный метод экспериментальной оценки лобового сопротивления транспортных средств. *Фундаментальные основы механики*, 2024, № 13, с. 45–48. <https://doi.org/10.26160/2542-0127-2024-13-45-48>
- [2] Добромиров В.Н. *Автомобили двойного назначения. Основы теории специальных свойств*. Москва, Издательство ООО «Глобал-Концепт», 2000, 225 с.
- [3] Магдина Е.Р., Кожуховский А.О., Добромиров В.Н. Метод исследования гидродинамических характеристик транспортно-технологических машин в аэродинамической трубе. *Грузовик*, 2025, № 5, с. 7–12. <https://doi.org/10.36652/1684-1298-2025-5-7-12>
- [4] Магдина Е.Р. Оценка влияния гидродинамического давления на движение экскаватора-погрузчика через водную преграду вброд. *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*, 2024, т. 21, № 5 (99), с. 672–690. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-672-690>
- [5] Босняков С.М., Ливерко Д.А., Михайлов С.В. и др. Низкочастотные пульсации на границе струи натурной дозвуковой аэродинамической трубы замкнутого типа. *Всерос. аэроакустический форум: сб. тез. Жуковский, Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского*, 2021, вып. 2807, 177 с.