

On Hydrodynamics of Caterpillar Track Rolling Motion on a Water Surface

A. V. Boyko, V. A. Yeroshin

*Research Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University (MGU),
Moscow, 119192, Russia*

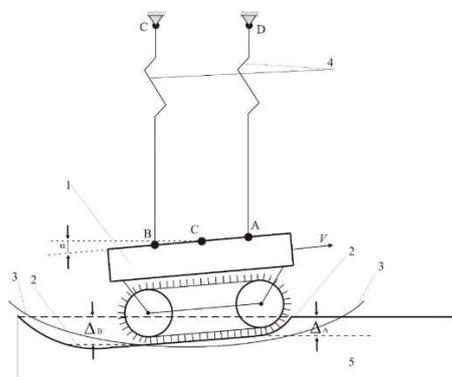
bandmail@mail.ru

Abstract

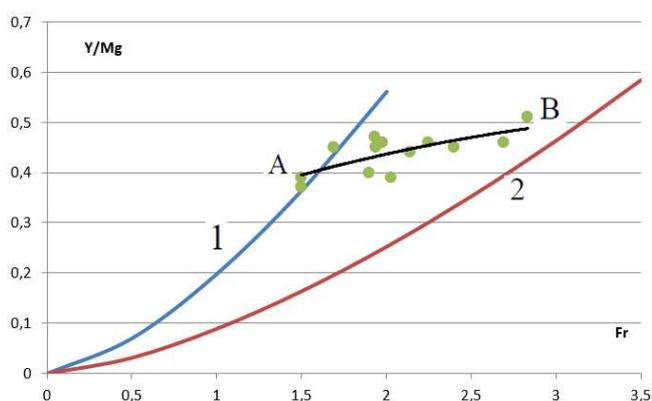
Air cushion crafts appeared in the 1930th are still among the best two-medium vehicles. However, surface apparatus on caterpillar tracks (snowmobiles) created in recent years are in some cases not inferior to them in terms of running and operational performance. They can roll on a water surface at high speed, and when moving on land and shallow water, their advantages are obvious. It should also be noted that caterpillar tracks simultaneously perform functions of both load-bearing surfaces and propulsors, which is also a certain advantage.

The article deals with hydrodynamic forces having effect upon caterpillar tracks at rolling motion on a free water surface and provides some experimental data.

Keywords: rolling motion on water, hydrodynamic forces, a caterpillar track.



Scheme of the experiment of the caterpillar track model



Dependence of dimensionless lift on the Froude number

$$\text{Dimensionless lifting force: } \frac{Y}{Mg} = 1.8 \cdot \left(\frac{\Delta_C}{D} \right) Fr^{3/2} \cdot \alpha$$

УДК 532.5.528

О гидродинамике качения гусеницы по поверхности воды

А. В. Бойко, В. А. Ерошин

*НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова,
Россия, Москва, 119192, Мичуринский пр-т, д.1
mailband@mail.ru*

Аннотация

Появившиеся в 30-е годы суда на воздушной подушке до сих пор являются одними из лучших двухсредных транспортных средств. Однако, созданные в последние годы надводные аппараты на гусеницах (снегоходы) в ряде случаев не уступают им по ходовым и эксплуатационным качествам. Они могут катиться по поверхности воды с большой скоростью, а при движении на суше и мелководью их преимущества очевидны. Отметим также, что гусеницы выполняют одновременно как функции несущих поверхностей, так и движителей, что также является определённым преимуществом.

В статье обсуждаются гидродинамические силы, действующие на гусеницы при качении по свободной поверхности воды и приводятся некоторые опытные данные.

Ключевые слова: качение по воде, гидродинамические силы, гусеница.

1. Введение

Увеличение скорости морских и речных судов является одной из важнейших задач гидромеханики. Многочисленные исследования, проведенные в этой области, привели к появлению скоростных надводных судов с динамическими принципами поддержания (глиссеры, суда на подводных крыльях, воздушной подушке). Эти суда обладают высокой скоростью и прекрасными ходовыми качествами. Однако в последние годы произошло некоторое расширение этой группы судов за счет быстроходных надводных объектов на колесах (багги) и гусеницах (снегоходы), причем их скорости в ряде случаев значительно превосходят скорости судов на подводных крыльях и воздушной подушке. Информация о гидродинамических характеристиках этих судов в литературе отсутствует. Все это заставляет нас заняться изучением их гидродинамических характеристик и подумать о практическом использовании этих судов.

Суда на колесах и гусеницах обладают рядом преимуществ. Прежде всего это высокая скорость качения по воде. Скорости глиссеров и судов на подводных крыльях составляют примерно $60 \div 70$ км/час, судов на воздушной подушке – $100 \div 110$ км/ч. А на колесах и гусеницах по спокойной воде можно катиться со скоростью $100 \div 200$ км/час и, возможно, быстрее (правда при малых скоростях они будут двигаться как водоизмещающие суда, но это отдельный вопрос выхода на «скоростной режим»). Такие суда будут востребованы при чрезвычайных ситуациях (например, наводнениях), при проведении розыскных и спасательных работ, оказании скорой и неотложной медицинской помощи в отдаленных районах страны, в том числе в условиях Арктической зоны. Таким образом имеются многочисленные случаи качения по воде на колесах и гусеницах, а общей теории этого вопроса пока нет, хотя первые шаги были сделаны еще в 60-е годы 20 века. [1–4]. В статье рассматривается качение надводных систем на гусеницах по спокойной поверхности воды. Описаны условия качения, проведено моделирование этого явления, получены зависимости осадки и несущей способности гусениц от числа Фруда, а также дана оценка положения границы области устойчивого качения и тяги гусениц.

Проведенные исследования являются продолжением и развитием работ по качению быстроходных надводных судов на колесах [5, 6]. Важное значение имеет и тот факт, что эти суда являются амфибиями и прекрасно себя чувствуют не только в воде, но и на дорогах с твердым покрытием и в условиях бездорожья. Можно ожидать, что в ближайшем будущем при соответствующем развитии этих исследований и появлении мощных и легких двигателей тематика качения по воде на колесах и гусеницах приобретет черты прорывного направления.

2. Моделирования явления качения

Особенностью явления качения гусениц по поверхности воды является то, что поддерживающая сила обусловлена динамической реакцией воды, как и при глиссировании, причем величина вертикальной составляющей гидродинамической силы практически такая же, как и при глиссировании. Однако существенным отличием является то, что они одновременно выполняют функции движителей. Транспортные средства подобного типа могут не только катиться по воде с большой скоростью, но и ходить по мелководью, а при движении на берегу не уступают внедорожникам.

Установившееся качение гусеницы по поверхности воды с большой скоростью определяется следующими параметрами [6, 7]:

$$V, \rho, g, m, l, D, B, h, \Delta \text{ и } \alpha, \quad (1)$$

где V – скорость; ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения; m – масса; l – длина нижней (плоской) части гусеницы; D и B – диаметр ведущего катка и ширина гусеницы; h – высота грунтозацепов; Δ – среднее погружение (осадка) середины гусеницы; α – угол атаки. При скорости движения более 80 км/час осадка мала по сравнению с диаметром ведущего катка гусеницы ($\Delta \ll D$). В этом случае основными безразмерными параметрами подобия, характеризующими качение (кроме геометрических), являются: V/\sqrt{gl} , m/M , Δ/D , α , где $M = \rho l^2 B$ – некоторая характерная масса системы, $Fr = V/\sqrt{gl}$ – число Фруда.

3. Измерение тяги гусеницы

Измерение тяги гусеницы проводилось на установке маятникового типа (рис. 1).

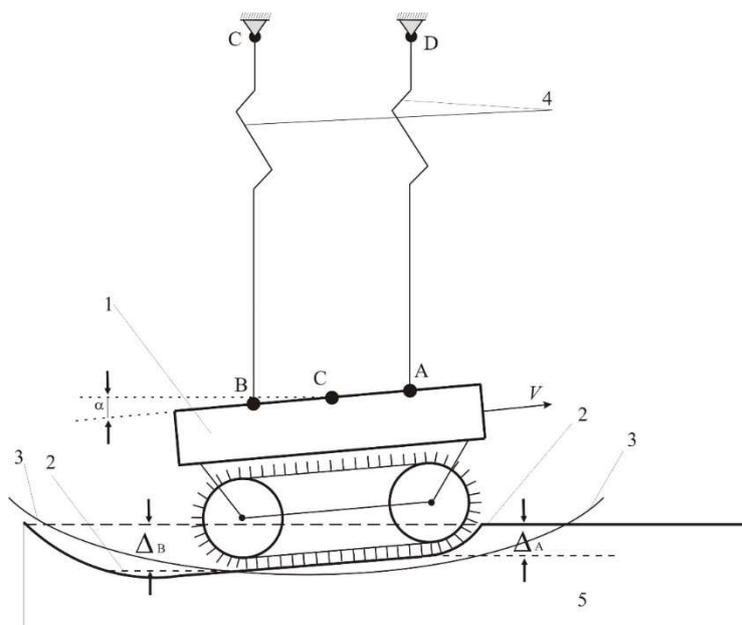


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 – модель; 2 – свободная поверхность воды; 3 – огибающая траекторий плеч при $Y < mg$; 4 – условное изображение свободных (ненатянутых) тросов ($Y > mg$); 5 – вода

Модель l подвешивалась над водой на длинных стальных тросах таким образом, чтобы ее верхняя часть (палуба) в процессе движения (колебания) маятника оставалась параллельной свободной поверхности воды. Глубина погружения плиц в воду регулировалась путем изменения уровня жидкости в гидроканале и составляла для неподвижно висящей модели 3–7 значений высоты грунтозацепов ($3 \div 7$ см.). Перед проведением эксперимента модель отводилась влево и закреплялась на некоторой начальной высоте H_0 . После освобождения модели включался двигатель, приводящий ведущий каток гусеницы во вращение с постоянной угловой скоростью ω . Затем модель разгонялась под действием силы тяжести и к моменту касания с водой приобретала скорость порядка $V = \sqrt{2gH_0}$.

Взаимодействие с водой модели с движущейся гусеницей приводило к увеличению (уменьшению) скорости и после выхода из воды она поднималась на высоту H_1 . При определении тяги гусеницы использовалась теорема об изменении кинетической энергии системы с идеальными связями. Учитывая разницу высот до и после взаимодействия с водой, а также другие параметры (массу m модели с гусеницей, длину пути S в воде и пр.), средняя величина тяги гусеницы T (точнее тяги минус сопротивление) определялась по формуле

$$T = \frac{mg(H_1 - H_0)}{S} \quad (2)$$

Расстояние S , пройденное гусеницей в воде, определялось по формуле $S = Vt$, где V – средняя скорость движения модели в воде, t – время взаимодействия гусеницы с водой, которое определялось из диаграммы угловой скорости ω ведущего катка гусеницы (рис. 2).

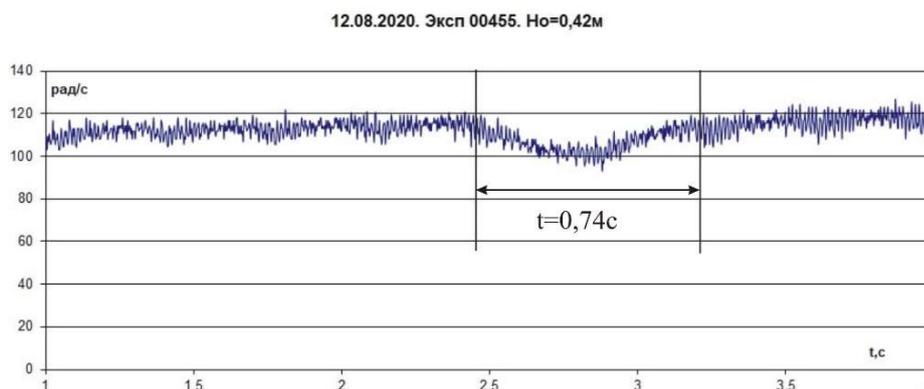


Рис. 2. Диаграмма зависимости угловой скорости ω от времени

На палубе модели в точках A , B и C были установлены лазеры, использовавшиеся для определения скорости модели V и углов атаки α гусеницы: $\alpha = (\Delta_B - \Delta_A)/l$, где Δ_A и Δ_B – заглобление (осадка) носа и кормы гусеницы, $l = AB$. Лазеры устанавливались в плоскости палубы модели. Их лучи, параллельные между собой и перпендикулярные плоскости колебания маятника, писали на экране, установленном на стенке канала траектории, позволяющие определить необходимые кинематические параметры движения модели (скорость, угол атаки, осадку Δ_k в точках A , B и C).

4. Оценка тяги гусеницы

Зависимость безразмерного коэффициента горизонтальной составляющей силы $C_T = T/0.5\rho V^2 Bh$ от безразмерного параметра P , равного отношению абсолютных скоростей нижней части гусеницы и надводной части модели $P = \omega \cdot R/V$ приведена на рис. 3. Здесь T – горизонтальная составляющая действующих сил, равная силе тяги гусеницы минус сопротивление; ρ – плотность воды; V – средняя скорость движения модели в воде; B – ширина гусеницы; h – высота грунтозацепов; ω и R – угловая скорость вращения ведущего катка гусеницы и его радиус.

Кружочками изображены опытные данные при значениях угла атаки $\alpha = 0$, треугольниками при $\alpha = 0.1$. Сплошными линиями изображены результаты обработки экспериментов методом наименьших квадратов при $\alpha = 0$ (1) и $\alpha = 0.1$ (2).

Эксперименты показывают, что для каждого угла атаки α_0 существует точка $P_0 = P(\alpha_0)$, в которой коэффициент C_T обращается в нуль: $C_T(P_0) = 0$. Это значит, что при скорости модели $V = V_0$ и соответствующей угловой скорости ведущего катка гусеницы ω_0 горизонтальная составляющая действующих сил (включая сопротивление воздуха и волновое сопротивление) обращается в ноль, т.е. для поддержания движения необходима энергия только для вращения гусеницы.

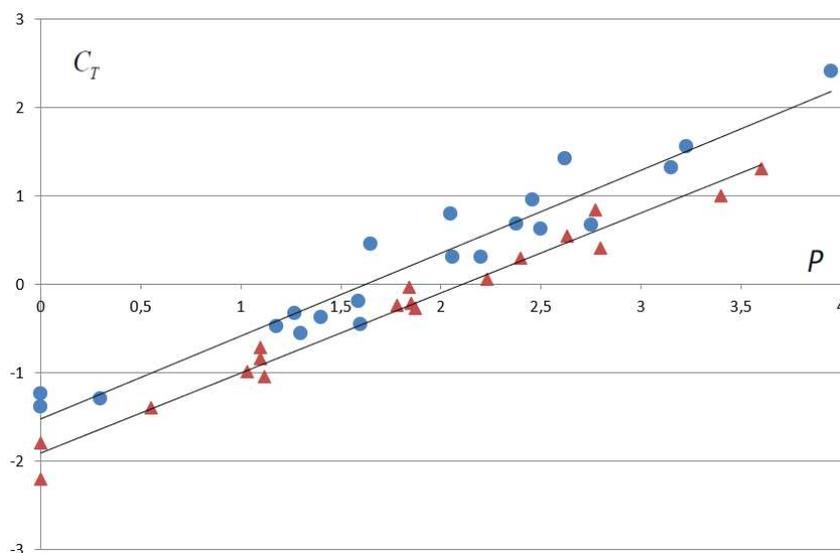


Рис. 3. Зависимость коэффициента горизонтальной составляющей действующих сил $C_T = T/0.5\rho V^2 B h$ от безразмерной скорости $p = (\omega R/V)$ модели

При $P < P_0$ модель тормозится, при $P > P_0$ разгоняется. Но главное, что при $P = P_0$ существует квазистационарный режим, при котором гусеница может катиться по воде практически не изменяя скорости.

5. Оценка размеров области взаимодействия гусеницы с водой

В формулу (2), которая используется для определения силы тяги, входит значение пути S взаимодействия гусеницы с водой. Казалось бы, ее величину нетрудно определить (как длину соответствующей хорды), если известно расстояние от точки подвеса маятника до нижней части грунтозацепов (точнее размера проекции этого расстояния на плоскость колебаний) и расстояние до воды. Однако эксперименты показали, что это не так. Длина пути взаимодействия S значительно больше. Это объясняется тем, что при погружении гусеницы в воду уровень жидкости перед ней поднимается, причем на увеличение размеров этой области, по-видимому, влияет отношение скорости модели к скорости поверхностных волн. Поэтому величина пути взаимодействия определялась по формуле: $S = V \cdot t$, где V – средняя скорость модели, t – время ее взаимодействия с жидкостью. На рис. 3 приведена диаграмма зависимости угловой скорости ω ведущего катка гусеницы от времени в процессе ее взаимодействия с водой. При входе в воду угловая скорость ведущего катка уменьшается из-за увеличения нагрузки на двигатель, при выходе восстанавливается прежнее значение. На рис. 4 приведена зависимость пути взаимодействия S от безразмерной скорости гусеницы $p = (\omega R/V)$, где R – радиус катка. Кружочками нанесены значения S , полученные при нулевом угле атаки $\alpha = 0$, треугольниками при $\alpha = 0.1$. Из графика видно, что при малых значениях угла атаки его влияние на величину S несущественно.

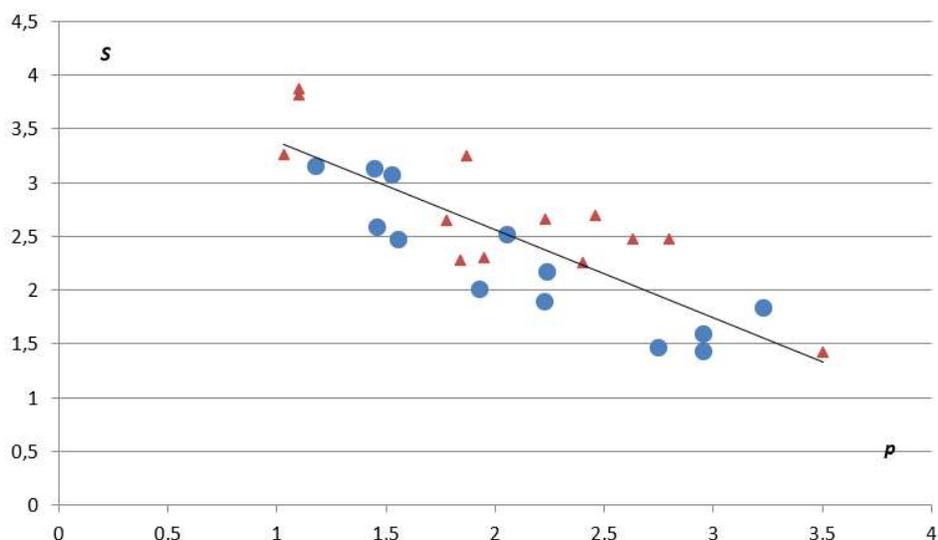


Рис. 4. Зависимость пути S взаимодействия гусениц с водой от безразмерной скорости гусеницы $p = (\omega R / V)$

6. Зависимость несущей способности гусеницы от числа Фруда

Положение модели в произвольный момент времени при ее качении по свободной поверхности воды можно описать, задавая осадку точки C гусеницы Δ_C (положение относительно невозмущенного уровня свободной поверхности нижней плоской части гусеницы, находящейся под центром масс модели) и угол атаки α . Опытные данные, полученные в результате проведенных экспериментов, показывают, что зависимость безразмерной подъемной силы Y/Mg от числа Фруда $Fr = V/\sqrt{gl}$ можно представить в виде

$$\frac{Y}{Mg} = C \cdot \frac{\Delta_C}{D} \cdot Fr^{3/2} \quad (3)$$

Здесь $M = \rho l^2 B$ – характерная масса модели; l – длина нижней (плоской) части гусеницы; B – её ширина.

Это говорит о том, что скорости движения моделей были недостаточно высокими и не вышли на уровень, когда безразмерная подъемная сила не зависит от числа Фруда.

В общем случае величина параметра C зависит от безразмерной массы модели (m/M) и угла атаки α (m – масса модели) [7]. Если предположить, что величина параметра C обратно пропорциональна углу атаки $C = C_1/\alpha$, а изменения угла атаки в процессе движения модели невелики, значение параметра C_1 можно определить по формуле

$$C_1 = \frac{1}{n} \sum \left(\frac{M}{m} \right) \cdot \left(\frac{\Delta_C^k}{D} \right) Fr^{3/2} \quad (4)$$

В таблице 1 приведена зависимость безразмерной осадки (Δ_C/D) точки C гусеницы от числа Фруда для такой серии экспериментов.

Таблица 1

Зависимость безразмерной осадки (Δ_C/D) от числа Фруда

$Fr = V/\sqrt{gl}$	1.50	1.90	2.69	2.25	2.03	1.50	1.69	1.93	2.83	1.94	2.40	2.14
(Δ_C/D)	1.19	0.85	0.58	0.76	0.75	1.12	1.13	0.98	0.60	0.93	0.67	0.79

Безразмерная масса модели была равна $(m/M) = 0.45$, средний угол атаки составлял $\alpha = 0.1$, а его изменения, измеряемые в процессе экспериментов, были невелики. Полученное при этом выражение для безразмерной подъемной силы имеет вид

$$\frac{Y}{Mg} = 1.8 \cdot \left(\frac{\Delta_C}{D} \right) Fr^{3/2} \cdot \alpha \quad (5)$$

Формула (5) даёт общее представление о характере зависимости безразмерной подъемной силы от числа Фруда и угла атаки. На рис. 5 кружочками приведены опытные данные зависимости безразмерной подъемной силы Y/Mg от числа Фруда $Fr = V/\sqrt{gl}$ (см. табл. 1). Сплошными линиями изображены зависимости Y/Mg при двух постоянных значениях осадки: $(\Delta_C/D) = 1.1$ (кривая 1) и $(\Delta_C/D) = 0.48$ (кривая 2). Вдоль кривой AB , полученной методом наименьших квадратов при обработке опытных данных, значения безразмерной осадки (Δ_C/D) , при которых происходит качение гусеницы по свободной поверхности воды, убывают от $(\Delta_C/D) = 1.1$ в точке A до $(\Delta_C/D) = 0.48$ в точке B . При больших значениях числа Фруда кривая AB , по-видимому, должна стремиться стать горизонтальной линией, т.е. Y/Mg не будет зависеть от числа Фруда.

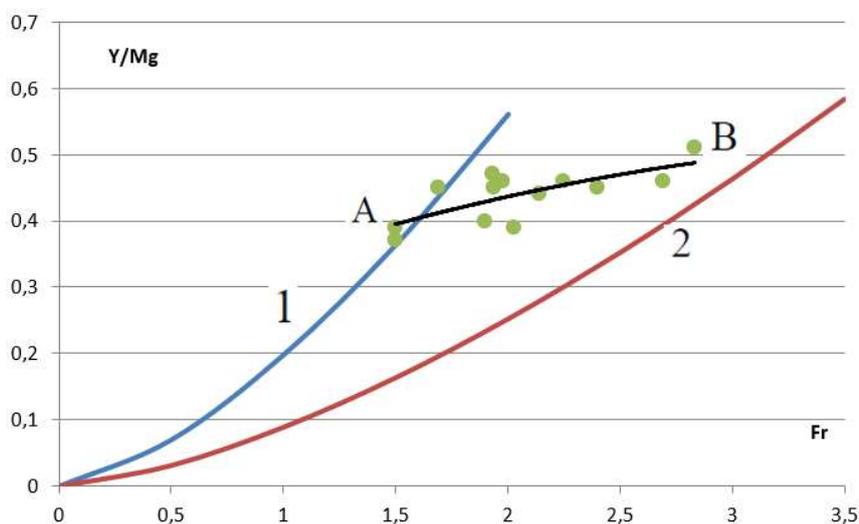


Рис. 5. Зависимость безразмерной подъемной силы Y/Mg от числа Фруда

7. Заключение

В результате проведенных исследований была разработана методика моделирования явления качения гусеницы по поверхности воды, и схемы измерения тяги и несущей способности гусеницы. Проведена оценка размеров области взаимодействия гусеницы с водой. Получены зависимости коэффициента тяги от безразмерной скорости гусеницы и подъемной силы гусеницы от числа Фруда. Приведенные опытные данные дают некоторое представление о величине числа Фруда, при котором начинается режим качения гусеницы по свободной поверхности воды, а также значения скорости модели при которых безразмерная подъемная сила не будет зависеть от числа Фруда.

Благодарности и ссылки на гранты

Авторы выражают благодарность Архангельскому Е. А. за изготовление модели и участие в проведенных экспериментах

Литература

1. Егоров И.Т., Соколов В.Т. Гидродинамика быстроходных судов. Л.: Судостроение. 1971. 424 с.

2. Константинов К.С. Снова по воде на колесах // Катера и яхты. 1973. № 45. С. 54–56.
3. Конов З.А. По воде на колесах // Катера и яхты. 1969. № 20. С. 10–14.
4. Taggart R. Recent Marine Propulsion Development // *Journal of the American Society of Naval Engineers*. May, 1960. Vol. 72. No. 2.
5. Eroshin V.A., Boyko A.V. Новые тенденции в гидродинамике надводных систем // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2019. Т. 20, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-1/articles/812/>
6. Eroshin V.A., Boyko A.V. Условия качения колесных транспортных средств // Наука и техника транспорта. 2019. № 3. С. 49–56.
7. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Изд. Наука. 1972. 440 с.

References

1. Egorov I. T., Sokolov V. T., *Hydrodynamics of high-speed ships*, L.: Sudostroenie, 1971, 424 p. [in Russian].
2. Konstantinov K. S., On the water again on wheels, *Boats and Yachts*, 1973, no. 45, pp. 54–56 [in Russian].
3. Konov Z. A., Across the water on wheels, *Boats and Yachts*, 1969, no. 20, pp. 10–14 [in Russian].
4. Taggart R., Recent Marine Propulsion Development, *Journal of the American Society of Naval Engineers*, 1960, vol. 72, issue 2, pp. 231–243.
5. Eroshin V. A., Boyko A. V., New trends in the hydrodynamics of high-speed overwater systems, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2019, vol. 20, issue 1 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-1/articles/812/>
6. Eroshin V. A., Boyko A. V., Rolling conditions of wheeled vehicles, *Science and technology of transport*, 2019, no. 3, pp. 49–56 [in Russian].
7. Sedov L. I., *Methods of similarity and dimension in mechanics*, M.: Ed. Science, 1972, 440 p. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 29 октября 2024 г.