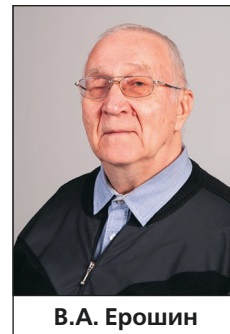


ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯГИ ГУСЕНИЦ ПРИ КАЧЕНИИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ

В статье описаны условия качения по воде гусеничных систем с грунтозацепами, проведено моделирование этого явления, получены зависимости осадки и несущей способности колесных систем от числа Фруда, приведена зависимость тяги гусениц от безразмерного параметра, равного отношению абсолютных скоростей нижней части гусеницы и надводной части модели.

Ключевые слова: идеальная несжимаемая жидкость, гусеница, качение по воде, гидродинамические силы, физическое моделирование

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_51



В.А. Ерошин



А.В. Бойко

До недавнего времени в число быстроходных надводных судов входили, в основном, глиссеры, экранопланы, суда на подводных крыльях и воздушной подушке. Их гидродинамические характеристики хорошо изучены, а соответствующие 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 подумать о практическом использовании этих судов и заняться изучением их гидродинамических характеристик. Тем более, что дискуссии о применении таких средств в качестве транспортных ведутся достаточно давно [1–5].

Моделирование явления качения

Для устойчивого качения гусеничных транспортных средств по свободной поверхности воды, необходимо выяснить условия выполнения этого процесса. Для этого необходимо выбрать определяющие параметры и определить их различные комбинации (из безразмерных величин).

Установившееся качение гусеницы по свободной поверхности воды с относительно большой скоростью можно определить с помощью следующих параметров [6–8]:

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

где ρ — плотность воды; V — скорость; m — масса; g — ускорение свободного падения; l — длина нижней (плоской) части гусеницы; B — ширина гусеницы; D — диаметр ведущего катка; h — высота грунтозацепов; Δ — среднее погружение (осадка) середины гусеницы;

Ерошин Владимир Андреевич, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник НИИ Механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ имени М.В. Ломоносова). Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела, гидродинамика. Автор более 60 научных работ. Имеет восемь патентов РФ.

Бойко Андрей Владимирович, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник НИИ Механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ имени М.В. Ломоносова), доцент кафедры «Транспортное строительство» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела, гидродинамика. Автор более 30 научных работ. Имеет один патент РФ.

α — угол атаки. Если скорость качения гусеничного транспортного средства более 80 км/ч, то осадка мала по сравнению с диаметром ведущего катка гусеницы ($\Delta \ll D$). Основными безразмерными параметрами подобия в таком случае, характеризующими движение

по воде (кроме геометрических), будут: $\frac{V}{\sqrt{gl}}, \frac{m}{M}, \frac{\Delta}{D}, \alpha$,

где $M = \rho l^2 B$ — некоторая характерная масса гусеничной системы, $Fr = \frac{V}{\sqrt{gl}}$ — число Фруда.

Оценка тяги гусеницы

Для гусеничных систем наибольший интерес представляет величина силы тяги, т.к. их несущая способность в значительной степени обеспечивается глиссирующими элементами, всегда имеющимися в таких конструкциях.

Измерение тяги гусеницы проводилось на установке маятникового типа (рис. 1). Модель 1 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 висащей модели 3–7 значений высоты грунтозацепов (3–7 см). Перед проведением эксперимента модель отводилась влево и закреплялась на

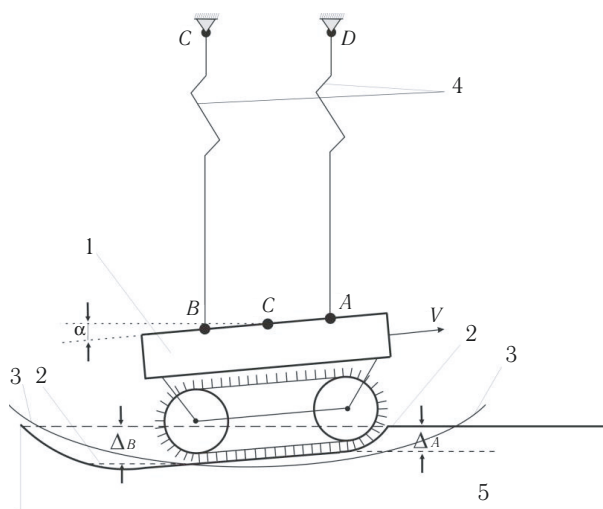


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — модель; 2 — свободная поверхность воды; 3 — огибающая траекторий плиц при $Y < mg$; 4 — условное изображение свободных (ненатянутых тросов)

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 [9;10]. 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 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).

На палубе модели в точках A , B и C были установлены лазеры, использовавшиеся для определения скорости модели V и угла атаки α гусеницы:

$$\alpha = \frac{\Delta_B - \Delta_A}{l}, \text{ где } \Delta_A \text{ и } \Delta_B \text{ — заглублиение (осадка) носа}$$

и кормы гусеницы, $l = AB$. Лазеры устанавливались в плоскости палубы модели [11;12]. 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).

На рис. 3 приведена зависимость безразмерного

коэффициента тяги $C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho V^2 B h}$ от безразмерного параметра $P = \frac{\omega R}{V}$, равного отношению абсолютных

скоростей нижней части гусеницы (создающей тягу) и надводной части конструкции. Здесь T — сила тяги; ρ — плотность воды; V — абсолютная скорость надводной части конструкции; B — ширина гусеницы; h — высота грунтозацепов; ω и R — соответственно угловая скорость и радиус катка гусеницы.

Экспериментальные точки изображены кружочками. Сплошной линией приведена зависимость,

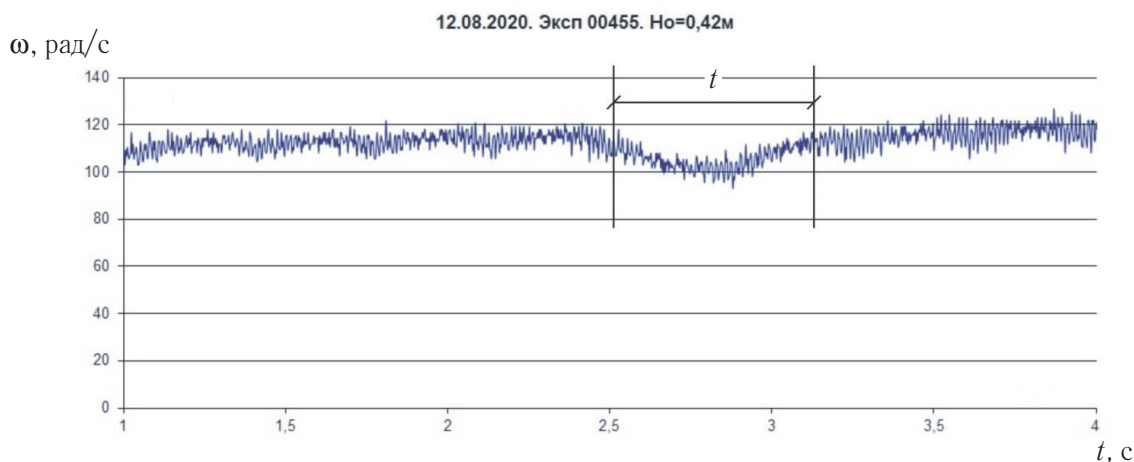


Рис. 2. Диаграмма зависимости угловой скорости ω от времени t

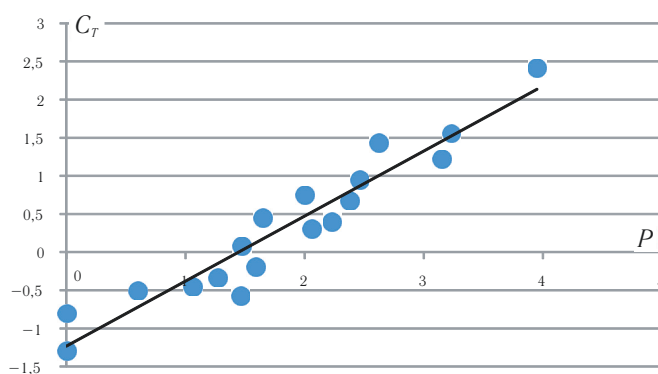


Рис. 3. Зависимость коэффициента тяги C_T гусеницы от параметра $p = \frac{\omega R}{V}$

полученная при обработке опытных данных методом наименьших квадратов [13;14]. В точке $P=0$ находятся опытные данные, полученные при буксировке неподвижной ($\omega=0$) гусеницы (коэффициент сопротивления значителен). В окрестности точки $P=1,4$ взаимодействие гусеницы с жидкостью, по-видимому, минимальное и величина силы тяги близка к нулю.

Влияние числа Фруда $Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}$ ($D=2R$) на величину тяги не обнаружено.

Оценка размеров области взаимодействия гусеницы с водой

В формулу (2), которая используется для определения силы тяги, входит значение пути S взаимодействия гусеницы с водой. Величину S нетрудно определить (как длину хорды окружности), если известно рас-

стояние 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: $S=Vt$, где V — скорость модели; t — время ее взаимодействия с жидкостью. На рис.2 приведена диаграмма зависимости угловой скорости ω ведущего катка гусеницы от времени t 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 $p = \frac{\omega R}{V}$, где R — радиус катка гусеницы. Кресточками 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.

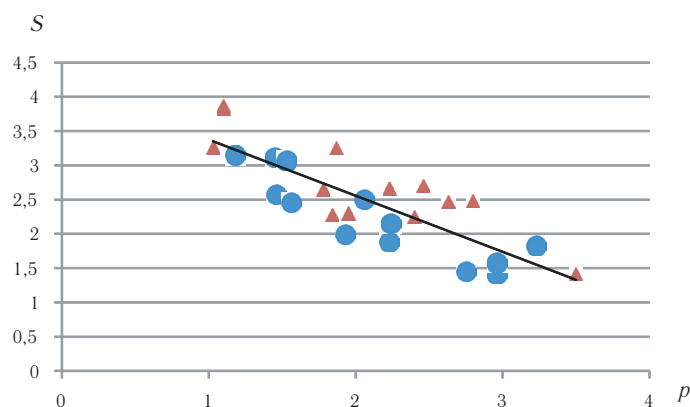


Рис. 4. Зависимость пути S взаимодействия гусениц с водой от безразмерной скорости гусеницы $p = \frac{\omega R}{V}$

Заключение

В результате проведенных экспериментов разработана и реализована методика, позволяющая моделировать качение гусеничных самоходных транспортных средств по поверхности воды. Предложены схемы измерения тяги и несущей способности гусеницы. Проведена оценка размеров области взаимодействия гусеницы с водой, а также получена зависимость коэффициента тяги и пройденного пути от безразмерной скорости гусеницы.



Литература

1. Константинов, К.С. Снова по воде на колесах/ К.С. Константинов. —Текст: непосредственный // Катера и яхты. —1973. —№45. —сент.-окт. —С. 54—56.
2. Конов, З.А. По воде на колесах/ З.А. Конов. —Текст: непосредственный // Катера и яхты. —1969. —№20. авг. —С.10—14.
3. P.C. Lombardini. R. Fidderman. A New Theory on Propulsion of High Speed Water Craft and its Application to the Hydroller. Proc. 7-th International Congress of Applied Mechanics 2. part II. 1948.
4. R. Taggart. Recent Marine Propulsion Development. «Journal of the American Society of Naval Engineers». May. 1960. v.72. N 2.
5. Егоров, И.Т. Гидродинамические особенности процесса качения тел по поверхности воды/ И.Т. Егоров. —Текст: непосредственный // Докл. XV научно-техн.конф. по теории корабля и гидромех.судна, апрель 1965. Крыловские чтения. —Вып. 64. —С.170—176.
6. Ерошин, В.А. Условия качения колесных транспортных средств / В.А. Ерошин, А.В. Бойко. —Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. —2019. —№3. —С.49—56.
7. Ерошин, В.А. Новые тенденции в гидродинамике и скоростных надводных систем/ В.А. Ерошин, А.В. Бойко. —Текст: электронный // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2019, Том 20, №1. —С. 9. —URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44211865> (дата обращения 02.09.2021).

8. Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. — Москва, 1972. — 440 с. — Текст: непосредственный.
9. Локтев, А.А. Упругопластическая модель взаимодействия цилиндрического ударника и пластинки / А.А. Локтев. — Текст: непосредственный // Письма в Журнал технической физики. — 2007. — Т. 33, № 16. — С. 72–77.
10. Glusberg B., Korolev V., Shishkina I., Loktev A., Shukurov J., Geluh P., Loktev D. Calculation of track component failure caused by the most dangerous defects on change of their design and operational conditions // В сборнике: MATEC Web of Conferences. 2018. С. 01054.
11. Loktev A.A. Non-elastic models of interaction of an impactor and an Uflyand-Mindlin plate // International Journal of Engineering Science. 2012. Т. 50. № 1. С. 46-55.
12. Локтев, А.А. Ударное взаимодействие твердого тела и упругой ортотропной пластинки / А.А. Локтев. — Текст: непосредственный // Механика композиционных материалов и конструкций. — 2005. — Т. 11, № 4. — С. 494–508.
13. Loktev D.A., Loktev A.A. Diagnostics of external defects of railway infrastructure by analysis of its images // В сборнике: Proceedings - 2018 Global Smart Industry Conference, GloSIC 2018. 2018. С. 8570083.
14. Glusberg B., Savin A., Loktev A., Korolev V., Shishkina I., Alexandrova D., Loktev D. New lining with cushion for energy efficient railway turnouts // Advances in Intelligent Systems and Computing (см. в книгах). 2020. Т. 982. С. 556–570.