

## О ДВИЖУЩИХ СИЛАХ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

*Коптилов В.И.*

*Тюменское высшее военно-инженерное командное училище  
имени А.И. Прошлякова, Тюмень*

**Ключевые слова:** механическая система, внутренние силы, внешние силы, реакции опорной среды, транспортная машина, человек, животные.

**Аннотация.** В статье на конкретных примерах опровергается сложившееся представление о том, что нарушение покоя и изменение режима движения всех механических систем вызывают непосредственно только внешние силы. Отмечается, что механические системы, имеющие источник активных внутренних сил (транспортные машины, человек, животные и др.) и взаимодействующие с окружающей средой, приводятся в движение непосредственно активными внутренними силами.

## ON THE DRIVING FORCES OF TRANSPORT VEHICLE

*Kopotilov V.I.*

*Tyumen higher military command School of engineering  
named after of Marshal of engineering troops A.I. Proshljakova, Tyumen*

**Keywords:** mechanical system, internal forces, external forces, environmental reaction, transport vehicle, human, animal.

**Abstract.** The article refutes the prevailing idea that disturbance of rest and change in the motion mode of all mechanical systems are caused directly only by external forces. It is noted that mechanical systems that have a source of active internal forces (transport vehicles, humans, etc.) and interact with the environment can be set in motion directly by active internal forces.

Как известно, закономерности движения механических систем отражают четыре основных теоремы динамики: о движении центра масс, об изменении количества движения, момента количества движения и кинетической энергии. Они связывают силы, импульсы сил, моменты сил и работу сил с соответствующими мерами движения системы, т.е. ускорением центра масс, количеством движения, кинетическим моментом и кинетической энергией. В учебниках по теоретической механике утверждается, что в уравнениях, выражающих первые три теоремы, в явном виде должны присутствовать только внешние силы. Отсутствие внутренних сил авторы обосновывают тем, что их векторная сумма и сумма моментов этих сил равны нулю. На этом формальном основании делается вывод, что внутренние силы не влияют на состояние механических систем [1], в том числе на транспортные машины, а также человека и животных.

Вместе с тем, в ряде работ авторы, признавая, что непосредственной причиной изменения состояния механической системы являются внешние силы, дают понять [2-5], а некоторые из них [6-9] прямо заявляют, что внутренние силы всё-таки оказывают косвенное воздействие на систему, поскольку они в той или иной мере определяют те внешние силы, которые и становятся якобы непосредственной причиной изменения её состояния.

К примеру, такой взгляд находит отражение в учебнике [6], в котором утверждается, что «Внутренние силы непосредственно не влияют на изменение количества движения материальной системы», но они «...могут оказать косвенное влияние через внешние силы» [6]. В подкрепление этого авторы приводят пример автомобиля, движение которого, как они полагают, «... осуществляется с помощью внешних сил трения скольжения, которые возникают между полотном дороги и ведущими колесами автомобиля...». При этом, добавляя авторы, «Эти внешние силы трения возникают за счёт внутренних сил, создающих вращающий момент на оси ведущих колёс, и наличия шероховатой связи (дороги)» [6]. Аналогичные примеры с автомобилем, паровозом или тепловозом приводят С.М. Тарг, Е.Л. Николаи, Л.Г. Лойцянский и А.И. Лурье, А. Зоммерфельд, А.А. Яблонский и В.М. Никифорова, и др. Другим примером, который приводится для доказательства исключительной способности только внешних сил вызывать движение механической системы, является перемещение человека, которого авторы рассматривают в сущности как биологическую транспортную машину.

П. Аппель, Н.В. Бухгольц, М.М. Гернет, С.М. Тарг, М.А. Павловский и многие другие механики, приводят примеры с перемещением человека и утверждают, что для шагающего человека движущей силой является сила трения, прикладываемая к ноге человека, которая является реакцией на его мускульную силу, передаваемую ногой опорной поверхности. Так, например, М.А. Павловский подчеркивает, что «Эта сила и является той внешней силой, которая вызывает движение человека» [10].

Рассмотрим, насколько указанные примеры подтверждают выдвигаемый тезис о том, что только внешние силы способны приводить механическую систему в движение, а внутренние лишь только в отдельных случаях, да и то косвенным образом за счёт влияния на внешние силы.

Сначала рассмотрим возможность внешних сил приводить в движение транспортную машину, ведущие колёса которой получают крутящий момент  $M_k$  от двигателя.

Момент  $M_k$ , подводимый к ведущему колесу, следует рассматривать как проявление пары активных внутренних сил, одна из которых ( $\vec{P}$ ) прикладывается к оси колеса, а вторая ( $\vec{P}_A$ ) к точке  $A$  его периферийной части, находящейся в контакте с дорогой (рис. 1).

Значение этих сил можно выразить, поделив момент  $M_k$  на плечо пары, т.е. на так называемый динамический радиус  $r_d$  колеса:

$$P = P_A = \frac{M_k}{r_d}. \quad (1)$$

Окружная сила  $\vec{P}_A$ , приложенная в точке  $A$ , создавая момент относительно оси  $O$  колеса, стремится вращать колесо, а сила  $\vec{P}$  – смещать ось вращения вдоль опорной поверхности. Так как колесо прижимается машиной к дороге силой тяжести  $\vec{G}$ , то окружная сила  $\vec{P}_A$  порождает силу трения  $\vec{F}_A$ , которая вместе с силой  $\vec{G}'$  воздействует на опорную поверхность. Последняя «в ответ»

прикладывает к колесу продольную  $\vec{R}_x$  и нормальную  $\vec{R}_z$  реакции, образующие главный вектор, а также пару сил с моментом  $M_f$ , называемым моментом сопротивления качению (рис. 1).

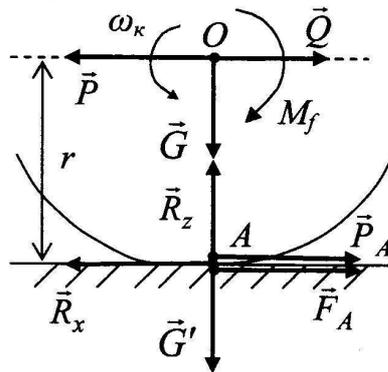


Рис. 1. Схема сил ведущего колеса

Так как нормальная реакция  $\vec{R}_z$  уравнивает прижимающее усилие  $\vec{G}$ , то они непосредственно не оказывают влияния на процесс движения.

Продольная реакция  $\vec{R}_x$  вместе с окружной силой  $\vec{P}_A$  колеса также образуют уравновешенную систему сил ( $\vec{R}_x + \vec{P}_A = 0$ ). Естественно, будучи уравновешенной, продольная реакция  $\vec{R}_x$  не может быть движущей силой, которая, как утверждается и приводит колёсную машину в движение. К тому же, продольная реакция, т.е. сила трения сцепления, не совершает механической работы, т.к. точка A её приложения (пятно контакта шины с дорогой) неподвижна ( $\vec{V}_A = 0$ ):

$$dA = \vec{R}_x \cdot \vec{V}_A \cdot dt = \vec{R}_x \cdot 0 \cdot dt = 0. \quad (2)$$

Если же ведущее колесо в процессе качения пробуксовывает, то работа силы трения скольжении при этом отрицательна, следовательно, воздействие внешней силы  $\vec{R}_x$  и в этом случае не может причиной поддержания, а тем более приращения кинетической энергии механической системы (колёсной машины).

Итак, из анализа действия внешних сил, приложенных к ведущему колесу видно, что ни нормальная ( $\vec{R}_z$ ), ни продольная реакция ( $\vec{R}_x$ ) не могут движущими силами колёсной машины.

Аналогичный вывод можно сделать и в отношении человека.

Действительно, при движении человека нормальные реакции уравнивают силу тяжести тела, поддерживая его центр масс на заданной высоте.

Продольные же реакции шероховатой поверхности противодействуют мышечным силам, которые человек прикладывает к стопам ног, толкающих в процессе движения опорную поверхность. Однако, продольные реакции, будучи силами трения, не совершают при этом никакой работы, т.к. стопа опорной ноги, воспринимающая продольную реакцию, не перемещается. Если же нога скользит по опорной поверхности, то работа продольной реакции при этом отрицательна, т.к. вектор скорости скольжения стопы и вектор продольной реакции противоположны.

Таким образом, и нормальная и продольная реакция опорной поверхности уравновешены и не совершают при движении человека никакой механической работы, поэтому они не способны обеспечить приращение кинетической энергии, следовательно, и не могут быть и причиной движения человека.

Итак, можно утверждать, что реакции внешних связей, в частности силы трения, не могут быть внешними движущими усилиями ни колёсной транспортной машины, ни человека. Они лишь подтверждают известное положение что «В механике реакция связи всегда считается *пассивной*. Это означает, что реакция связи не может самостоятельно вызвать движение, не приводящее к нарушению связи, а может тормозить такое движение или препятствовать его возникновению» [11].

Поскольку других внешних сил, которые хоть как-то могли бы претендовать на роль движущей силы нет, то приходится констатировать, что движение самоходной транспортной машины и человека вызывают не внешние, а именно *активные внутренние* силы. И этому есть теоретические основания.

Савин Г.Н., Кильчевский Н.А., Путьята Т.В. отмечают, что хотя внутренние силы действия и противодействия равны и противоположно направлены, но прикладываются они к разным телам, поэтому «Само собой разумеется, что ... систему внутренних сил, действующих на точки *изменяемой* материальной системы, *нельзя рассматривать как уравновешенную систему сил*» [12]. На это же указывает и Я.Л. Геронимус, который отмечает, что «аксиома о двух силах и аксиома о присоединении или отбрасывании уравновешивающихся сил не применимы в общем случае материальной системы – поэтому *в общем случае материальной системы внутренние силы не уравновешиваются и не могут быть отброшены*» [13]. Всё это указывает на то, что отбрасывание внутренних сил механической системы на том основании, что их главный вектор равен нулю, в общем случае является опрометчивым шагом и приводит к ошибочным выводам.

О способности внутренних сил приводить в движение механическую систему, имеющую внутренний источник энергии, свидетельствует и теорема об изменении кинетической энергии, аналитическое выражение которой можно представить следующим образом:

$$T - T_o = \sum_{k=1}^N A(\vec{F}_k^i) + \sum_{k=1}^N A(\vec{R}_k^i) + \sum_{k=1}^N A(\vec{F}_k^e) + \sum_{k=1}^N A(\vec{R}_k^e), \quad (3)$$

где  $T$  и  $T_o$  – кинетическая энергия механической системы в конечный и начальный момент времени;

$A(\vec{F}_k^e)$  и  $A(\vec{F}_k^i)$  – суммарная работа соответственно активных внешних и внутренних сил, приложенных к  $k$ -ой материальной точке системы;

$A(\vec{R}_k^e)$  и  $A(\vec{R}_k^i)$  – суммарная работа соответственно реакций внешних и внутренних связей, приложенных к  $k$ -ой материальной точке системы.

Действительно, из уравнения (3) следует, что при отрицательной или нулевой работе внешних и внутренних реакций (т.е. пассивных сил) положительное значение кинетической энергии может обеспечить лишь механическая работа активных внешних и внутренних сил. Если же активных внешних сил нет, то прирост или поддержание кинетической энергии

механической системы на заданном уровне обеспечивают, очевидно, активные внутренние силы. Именно такое явление наблюдается, например, у всех транспортных машин и животных, которые обладают собственным источником активных внутренних сил, в качестве которого выступает обычно двигатель внутреннего сгорания или мышечная система.

Если же у механической системы нет не только активных внешних, но и активных внутренних сил, то изменение кинетической энергии такой системы определяют только пассивные силы, т.е. внутренние и внешние сопротивления. Постольку работа таких сил отрицательна, то из уравнения (3) прямо следует, что неизбежным результатом их действия является потеря кинетической энергии системы и в конечном счёте прекращение её движения.

Итак, приходится признать, что движение самоходной транспортной машины обеспечивают не что иное как силы давления газов в двигателе, которые посредством трансмиссии трансформируются во *внутренние* силовые пары, подводимые к ведущим колёсам. И это не противоречит всем положениям динамики механической системы.

Воспринимая внешние продольные реакции  $\vec{R}_x$  дороги, которые уравнивают внутренние силы  $\vec{P}_A$ , ведущие колёса тем самым нарушают векторный баланс активных внутренних сил машины, что вызывает образование *главного вектора системы внутренних сил* ( $\vec{P}^\Sigma$ ), направленного в сторону, противоположную тому, куда были направлены эти окружные усилия  $\vec{P}_A$ . Данный вектор складывается из продольных сил ( $\vec{P}$ ) указанных выше силовых пар, подводимых к ведущим колёсам транспортной машины (рис. 1), которые становятся при этом силами тяги [14], т.е.  $\vec{P}^\Sigma = \sum \vec{P}_k$ , где  $\vec{P}_k$  – вектор силы тяги  $k$ -го ведущего колеса транспортной машины.

Каждая сила тяги  $\vec{P}_k$ , являясь активной *внутренней* силой, толкает ведущее колесо и совершает положительную механическую работу, источником энергии которой является при этом двигатель.

Если проекция на продольную ось  $x$  главного вектора активных внутренних сил ( $P_x^\Sigma$ ), т.е. силы тяги машины, превышает проекцию главного вектора  $\vec{F}_k^e$  всех внешних сил, создающих сопротивление, то в полном соответствии с теоремой о движении центра  $C$  масс машина получает продольное ускорение:

$$w_x^C = \frac{P_x^\Sigma - F_x^e}{m}, \quad (4)$$

где  $w_x^C$  – ускорение центра масс системы (транспортной машины);

$m$  – масса системы (транспортной машины).

Проведённый анализ показывает, что у механической системы, имеющей источник активных внутренних сил, способных совершать положительную работу, движение системы могут обеспечивать *непосредственно активные внутренние* силы. Однако, это становится принципиально возможным только в том случае, если *реакции внешних связей уравнивают часть активных внутренних сил*, подводимых к опорным элементам системы (ведущему колесу машины, ноге человека, лапе животного, крылу птицы...), оказывающим

непосредственное давление на опорную среду. В этом и заключается ранее сформулированный автором принцип опорного движения [15].

Если механическая система является замкнутой или соответствующих реакций опорной среды нет (за её отсутствием или контакта с ней), то движение механической системы как таковой за счёт внутренних сил в принципе не возможно. Возможно лишь движение за счёт создаваемой давлением газов так называемой реактивной силы тяги, являющейся активной *внутренней* силой, образование которой сопряжено с неизбежной потерей массы самой системы.

Самостоятельного движения не может быть и тогда, когда у механической системы нет источника активных внутренних сил, совершающих положительную работу или соответствующих условий для их трансформации в движущее усилие.

Сказанное выше в полной мере касается и процесса движения человека, которого можно рассматривать как биомеханическую систему, имеющую внутренний источник энергии, в роли которой выступает его мышцы.

Таким образом, приводимые в учебниках по теоретической механике примеры не только не подтверждают статус внешних реакций как сил, вызывающих движение механической системы, но и, по сути, опровергают тезис об исключительной роли внешних сил.

Сказанное выше позволяет сформулировать следующие выводы.

1. Реакции внешних и внутренних связей не являются движущими силами механической системы, в том числе и любой транспортной машины.

2. Самостоятельное перемещение некоторых механических систем, имеющих внутренний силовой источник активных внутренних сил, например, таких как транспортная машина, человек или животное, осуществляется за счёт непосредственного действия активных внутренних сил.

3. Самостоятельное перемещение всех наземных машин, судов и летательных аппаратов, имеющих источник активных внутренних сил, без соответствующего взаимодействия элементов их движителя с опорной средой (земной поверхностью, водой и воздухом) и восприятия от неё реакций, невозможно (исключение составляют машины с реактивным двигателем, силу тяги в которых создают активные внутренние силы давления газов).

4. Движение механических систем, не имеющих источника активных внутренних сил, возможно только лишь при действии активных внешних сил.

#### Список литературы

1. Копотилов В.И. Влияние внешних и внутренних сил на движение механических систем // Материалы Всеросс. научн.-метод. конф. «Современная педагогика и научные исследования в образовательной организации высшего образования». – Кострома: ВАРЗБЗ им. маршала С.К.Тимошенко, 2022. – с. 558-570.
2. Гернет М.М. Курс теоретической механики: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1981. – 304 с.
3. Некрасов А.И. Курс теоретической механики. Том II. Динамика. Изд. 2-е. Учебник для Вузов. – М.: Гостехиздат, 1953. – 503 с.
4. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. Учебник для втузов. – М.: Высшая школа, 2003. – 719 с.
5. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. Учебник для втузов. – М.: Высшая школа, 2004. – 416 с.

6. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. В 2-х томах. 10-е изд., стер.– СПб.: Изд-во «Лань», 2008. – 736 с.
7. Бухгольц Н.Н. Основной курс теоретической механики. Ч.2. Динамика системы материальных точек. Учебник для университетов. – М.: Наука, 1969. – 332 с.
8. Ворович И.И. Лекции по динамике Ньютона. Современный взгляд на механику Ньютона и её развитие. В 2-х ч. Ч. 2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 604 с.
9. Невзглядов В.Г. Теоретическая механика. Учебник для университетов. – М.: Физматиздат, 1959. – 584 с.
10. Теоретическая механика. Динамика: Учебник. / Под общей ред. М.А. Павловского. – Киев: Выща школа, 1990. – 480 с.
11. Голубев Ю.Ф. Основы теоретической механики: Учебник. 2-е изд., перераб. и дополн. – М.: Изд-во МГУ, 2000. – 719 с.
12. Савин Г.Н., Кильчевский Н.А., Путята Т.В. Теоретическая механика. Учебник для ВУЗов. 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Гостехиздат УССР, 1963. – 610 с.
13. Геронимус Я.Л. Теоретическая механика (очерки об основных положениях). – М.: Наука. Глав. ред. физ-мат. лит-ры, 1973. – 512 с.
14. Коптилов В.И. Сила тяги и механизм её образования // Автомобильная промышленность. – 2015. – № 7. – С. 4-9.
15. Коптилов В.И. Принципы движения транспортных машин // Вестник машиностроения. – 2018. – № 11. – С. 42-47.

Сведения об авторе:

*Коптилов Владимир Ильич* – к.т.н., доцент, профессор.