

УДК 629.033

## Моделирование прямолинейного движения транспортно-технологического средства с роторно-винтовым двигателем

**В.Н. Наумов, К.Ю. Машков, К.Е. Бяков**

*Выбор двигателя для транспортной техники — серьезнейшая задача для проектировщика. При движении транспортного средства по снегу и болоту применение шнекового двигателя (роторно-винтового) особенно нетрадиционного гибкого шнека, может быть весьма перспективным.*

*В статье рассмотрено использование современных методов компьютерного моделирования при исследовании транспортно-технологических средств (ТТС) с роторно-винтовым двигателем (РВД). Приняты допущения, ограничивающие задачу анализа прямолинейного движения, разгона и торможения ТТС с РВД, выбрана модель грунтового основания, на котором перспективна эксплуатация машины с РВД. Оценена система сил, действующих на шнекоход при его взаимодействии с опорным основанием. Использование современных компьютерных программных пакетов позволяет упростить процесс моделирования. Рассмотрены варианты определения скорости шнекохода и времени разгона этой скорости. Приведен графический результат моделирования, соответствующий по характеру зависимостям, приводимым в других исследованиях.*

*В результате исследования установлено, что предлагаемая методика моделирования движения транспортных комплексов с РВД упрощает задачу расчета РВД.*

**Ключевые слова:** двигатель, роторно-винтовой двигатель, шнековый двигатель, моделирование, компьютерное моделирование, прямолинейное движение.

## Simulation of a straight-line motion of a vehicle with a rotary-screw driver

**V.N. Naumov, K.Yu. Mashkov, K.E. Byakov**

*Choosing a driver for vehicles is a challenge for designers. When a vehicle moves over snow or swamp terrain, the use of a screw (rotary screw and especially non-traditional flexible screw) driver can be quite promising. The paper examines the application of modern computer simulation techniques to study vehicles with a rotary screw driver (RSD). Certain constraints are imposed on the problem analyzing the straight-line motion, acceleration and deceleration of vehicles with RDS. A model of a ground material which shows potential for the operation of vehicles with RDS is chosen. A system of forces acting on a screw driver interacting with the support base is evaluated. Using advanced computer software packages allows us to simplify the simulation. The speed and accelera-*



**НАУМОВ**  
Валерий Николаевич  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**NAUMOV**  
Valeriy Nikolaevich  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)



**МАШКОВ**  
Константин Юрьевич  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**MASHKOV**  
Konstantin Yur'evich  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)



**БЯКОВ**  
Константин Евгеньевич  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**BYAKOV**  
Konstantin Evgen'evich  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)

*tion of a screw driver are determined. The results of simulation displayed graphically are in good agreement with the relationships presented in other studies. It has been found that the proposed technique for modeling the movement of vehicles with RDS facilitates the calculation of rotary screw drivers.*

**Keywords:** soil, ground material, mobile robotic system, rotary screw driver, screw driver, modeling, simulation, straight-line motion.

В настоящее время большинство инженеров и научных работников во всем мире используют программный пакет MATLAB Simulink и подобные ему для расчетов и моделирования различных процессов. Компьютерное моделирование стало неотъемлемой частью исследований, проводимых при создании разнообразных транспортных средств и мобильных робототехнических комплексов. Однако очевидно, что в большинстве подобных работ рассматривается движение колесных и гусеничных машин. Как же обстоят дела с моделированием транспортных средств, оснащенных роторно-винтовым двигателем (РВД)?

Первая публикация по теоретическому исследованию шнековой машины, расчету и эксперименту на модели была напечатана в Англии в 1961 г. [1]. В настоящее время количество работ, посвященных РВД, значительно уступает аналогичным работам по традиционным типам шасси. Однако, в связи со значительным разнообразием грунта на территории нашей страны исследователи регулярно обращались к теме шнековых вездеходов. Прежде всего, речь, конечно же, идет о разработках Завода им. Лихачева и Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (бывшего Горьковского политехнического института (ГПИ)) [2]. Именно в ГПИ впервые было проведено исследование взаимодействия цилиндрического штампа, имитирующего поверхность РВД со снегом. При этом использовались цилиндрические штампы с вмонтированными датчиками давления [3].

Большинство информации по теме создания и исследования шнековых вездеходов является закрытой, поэтому найти источники, содержащие данные, необходимые для проведения компьютерного моделирования движения транспортно-технологического средства (ТТС) с РВД сложно. Естественно, вопрос изучения параметров движения шнекового двигателя трудно вписать в рамки одной статьи. Ограничимся рассмотрением случая прямолинейного перемещения мобильного комплекса с РВД.

При изучении движения любого транспортного средства сначала рассматривается модель грунтового опорного основания. Общепринятыми расчетными характеристиками, позволяющими количественно оценить грунт, в терра-механике являются показатели несущих свойств материала основания, т. е. параметры функциональной зависимости сопротивления грунтов смятию нагрузками, действующими по нормальям к элементарным площадкам деформатора, и показатели сцепных свойств — соответственно параметры функциональной зависимости сопротивления грунта сдвигу [4]. При изучении движения ТТС с РВД целесообразно принять за основу математические модели грунта, предложенные в работах [5, 6] исследователями движения вездеходных (в том числе не в последнюю очередь шнековых) машин Н.Ф. Кошарным и А.П. Куляшовым. Эти модели основаны на обширных экспериментальных исследованиях и больше других совпадают с наиболее распространенными моделями, применявшимися в теории передвижения транспортных средств по слабонесущим грунтам.

Сопротивление грунтов нормальным нагрузкам  $\sigma_n$  можно описать следующими уравнениями [5, с. 43]:

$$\sigma_n = [C(B) + C_V \dot{z}] z^n$$

при глубине погружения РВД менее половины [5] (или 0,4 [6]) радиуса базового цилиндра ротора ( $z < 0,4r_0$  или  $z < 0,5r_0$ ) и

$$\sigma_n = [C(B) + C_v \dot{z}] z_{\max}^\mu \cos \alpha_\sigma$$

при ( $z \geq 0,4r_0$  или  $z \geq 0,5r_0$ ). Здесь  $C(B)$  — коэффициент масштабного фактора;  $C_v$  — коэффициент вязкости грунта;  $\mu$  — показатель нелинейности;  $z$  — глубина погружения движителя в грунт.

Модель сопротивления сдвигу  $\tau_k$  описывается тем же автором с помощью обобщенной эмпирической формулы [5, с. 53, 100]:

$$\tau_k = \tau_0 + (\tau_n - \tau_0)(1 - e^{-k_\tau S_0} + m_\tau S_0^{n_\tau} e^{-m_\tau S_0}),$$

где  $\tau_k$  — удельное сопротивление сдвигу;  $k_\tau$ ,  $n_\tau$ ,  $m_\tau$  — эмпирические коэффициенты;  $S_0$  — относительный сдвиг;  $\tau_0$  — начальное сопротивление сдвигу;  $\tau_n$  — конечное сопротивление сдвигу.

После выбора математической модели грунта необходимо принять систему координат, в которой происходит движение ТТС с РВД. При изучении движения машины целесообразно выбрать стандартную пару — инерционную и связанную системы координат (рис. 1). Из теоретической механики твердого тела следует, что движение ТТС в инерциальной системе координат, которую считаем неподвижной относительно поверхности дна, определяется шестью дифференциальными уравнениями 2-го порядка. В свою очередь, шесть независимых параметров, характеризующих мгновенное положение ТТС относительно условной поверхности дна, представляют собой шесть степеней сво-

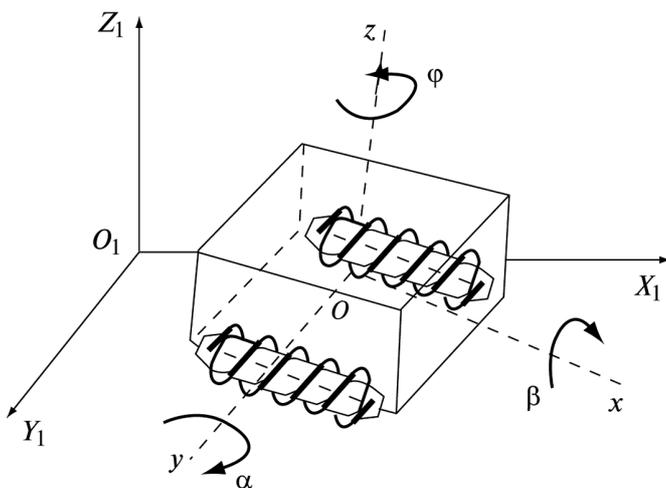


Рис. 1. Системы координат [4]

боды: три координаты центра масс и три угла, отражающих взаимное положение связанной и инерциальной системы координат.

Таким образом, уравнения движения ТТС с РВД, как твердого тела с условно постоянной собственной массой в связанной (подвижной) системе координат, при допущении, что его главные оси инерции совпадают со связанными осями на основании принципа Д’Аламбера записываются в виде системы уравнений, включающей 12 дифференциальных уравнений, связывающих между собой 12 фазовых координат ТТС (независимые параметры движения ТТС в пространстве) [4].

Поскольку исследуется динамика ТТС в плоскости движения, целесообразно упростить систему уравнений, выделив плоское движение ТТС. При этом количество указанных выше фазовых координат уменьшается до шести, порядок дифференциальных уравнений понижается, и система уравнений для моделирования движения принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= -\dot{\psi}; \\ v_x &= \dot{x} \cos \psi - \dot{y} \sin \psi; \\ v_y &= \dot{x} \sin \psi - \dot{y} \cos \psi; \\ m(\ddot{x} - \dot{\phi} \dot{y}) &= P_x; \\ m(\ddot{y} - \dot{\phi} \dot{x}) &= P_y; \\ J_x \ddot{\phi} &= M_z, \end{aligned}$$

где  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$ ,  $\dot{\phi}$ ,  $\ddot{x}$ ,  $\ddot{y}$ ,  $\ddot{\phi}$  — скорости и ускорения движения ТТС с РВД вперед, вбок и вокруг вертикальной оси связанной системы координат  $Oxyz$ ;  $\phi$  — угол поворота связанной системы координат относительно инерциальной;  $v_x$ ,  $v_y$  — проекции на оси инерциальной системы вектора линейной скорости центра масс ТТС;  $P_x$ ,  $P_y$  — суммарные силы, действующие на ТТС с РВД относительно осей  $Ox$  и  $Oy$ ;  $M_z$  — суммарный момент относительно оси  $Oz$ ;  $J_x$  — момент инерции ТТС относительно оси  $Ox$ .

Примем логичное допущение, что движение машины в направлении оси  $Oz$  подвижной системы координат и изменение крена и дифферента неуправляемо и зависит от продольного и поперечного профилей опорной поверхности, ее физико-механических свойств, внешних силовых возмущений, вертикальных колебаний машины и т. п. Соответственно, влияние дви-

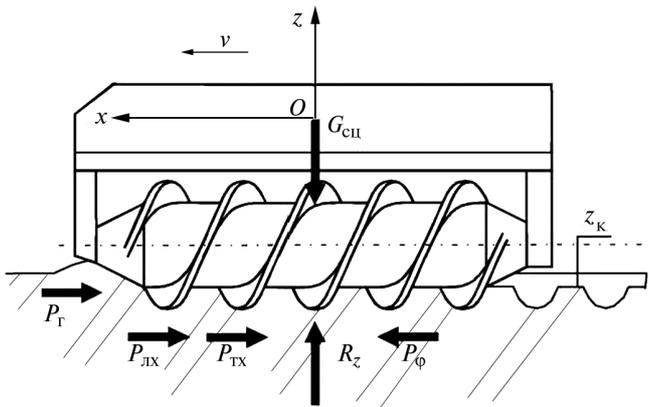


Рис. 2. Основные силы, действующие на ПТС с РВД при взаимодействии с опорным основанием  $Oxz$  [1]:

$G_{сш}$  — сцепной вес;  $z_k$  — глубина погружения движителя

жителя распространяется только на параметры движения машины по осям  $Ox$  и  $Oy$  и угол  $\phi$ .

Это допущение упрощает задачу, поскольку в данном случае анализ непосредственно прямолинейного движения (рис. 2), разгона и торможения ТТС с РВД проводится на основе решения уравнения

$$\ddot{x} = m^{-1} (P_{\phi} - P_f - P_{pOx}) + \dot{\phi} \dot{y},$$

где  $P_{\phi}$  и  $P_f$  — соответственно силы тяги (сцепления) и сопротивления движению ТТС;  $P_{pOx}$  — сила, действующая на роторно-винтовое ТТС от рабочих органов (реакция связи с рабочим органом) по оси  $Ox$  связанной системы координат.

Будем считать, что оба шнека, движущиеся по грунтовым основаниям, обладают одинаковыми параметрами, а их угловые скорости вращения роторов  $\omega$  равны между собой. В данном случае скорости поворота и бокового увода равны нулю:

$$\dot{\phi} = \dot{y} = 0.$$

Кроме того, дополнительных сил сопротивления от рабочего оборудования нет, следовательно, силой  $P_{pOx}$  можно пренебречь.

Таким образом, в общем виде основное уравнение принимает следующий вид:

$$P_{\phi} + P_f / m = \ddot{x}.$$

Для определения силы сцепления одиночного РВД можно использовать формулы, приведенные в работе [5], либо формулы из работы [6].

Сила сопротивления движению РВД включает три составляющих [5, 6]:

$$P_f = P_{\Gamma} + P_{тх} + P_{лх}.$$

где  $P_{\Gamma}$  — сила сопротивления колеобразованию;  $P_{тх}$  — продольная составляющая силы трения скольжения базового цилиндра;  $P_{лх}$  — продольная составляющая силы трения скольжения винтовых лопастей.

Уравнения, включающие в себя основные конструктивные параметры ТТС с РВД и параметры математической модели грунта [5, 6], позволяют определить силы сопротивления и сцепления одиночного РВД. Очевидно, что при указанных выше условиях движения найденные параметры движения одиночного ротора будут соответствовать параметрам движения машины в целом.

В большинстве работ по моделированию движения роторно-винтовых машин для нахождения  $\dot{x}$  выполняются непростые вычисления с аппроксимацией приведенных выше экспоненциальных зависимостей силы тяги с последующим представлением и решением основного дифференциального уравнения в виде трехчлена с громоздкими коэффициентами [4, 7]. Использование современных вычислительных средств, например, программы MatLab Simulink, позволяет значительно облегчить процесс моделирования прямолинейного движения ТТС с РВД. Кроме того, в них возможно задавать угловые скорости вращения роторов в виде зависимостей  $\omega(t)$ , что позволяет рассчитывать теоретическую и действительную скорости ТТС для разных случаев разгона и торможения шнекоходного комплекса и получать результаты расчета всех параметров движения в виде графических зависимостей. Большой интерес также представляет возможность варьирования входных параметров двигателя и трансмиссии моделируемого ТТС.

Так, полученные моделированием по приведенному алгоритму с использованием формул Н.Ф. Кошарного напрямую без указанных

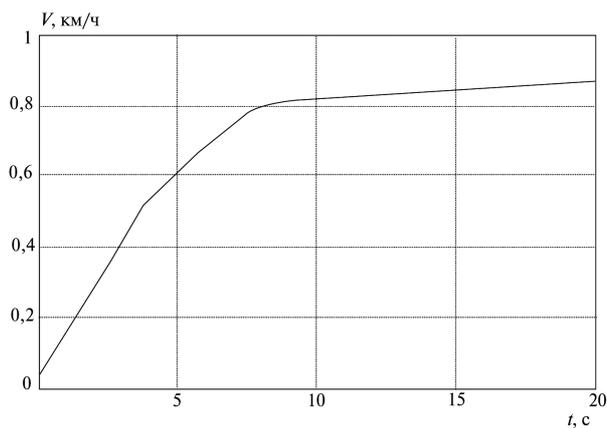


Рис. 3. Пример результата компьютерного моделирования процесса разгона ТТС с РВД

выше математических преобразований зависимости основных параметров прямолинейного движения ТТС соответствуют по характеру зависимостям, приводимым в работах [4, 7] (рис. 3).

Таким образом современные программы, предназначенные для компьютерного моделирования различных процессов могут значительно облегчить задачу моделирования движения не только широко распространенных гусеничных и колесных машин, но и комплексов с РВД.

### Литература

- [1] Cole B.N. Inquiry into amphibious screw traction. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1961, vol. 75, no. 19, pp. 1–10.  
 [2] Николаев А.Ф., Куляшов А.П. *Роторно-винтовые амфибии*. Горький, Волго-Вятское кн. изд-во, 1973, 47 с.

- [3] Баракханов Л.В., Ершов В.И., Куляшов А.П., Рукавишников С.В. *Снегоходные машины*. Горький, Волго-Вятское кн. изд-во, 1986, 191 с.  
 [4] Донато И.О., Жук В.А., Кузнецов Б.В., Куляшов А.В., Шапкин В.А., Щербаков Ю.А. *Роторно-винтовые машины. Основы теории движения*. Н. Новгород, НПК, 2000, 451 с.  
 [5] Кошарный Н.Ф. *Технико-эксплуатационные свойства автомобилей высокой проходимости*. Киев, Высшая школа, 1981, 208 с.  
 [6] Куляшов А.П. *Специальные строительно-дорожные машины с роторно-винтовым двигателем*. Дисс. д-ра ... тех. наук. Горький, 1986, 327 с.  
 [7] Щербаков Ю.В. *Разработка методики расчета и выбор рациональных параметров движения подводного транспортно-технологического средства с роторно-винтовым двигателем*. Дис. ... канд. техн. наук. Н. Новгород, НГТУ, 2000, 167 с.

### References

- [1] Cole B.N. Inquiry into amphibious screw traction. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1961, vol. 75, no. 19, pp. 1–10.  
 [2] Nikolaev A.F., Kuliashov A.P. *Rotorno-vintovye amfibii* [Rotary Screw amphibians]. Gor'kii, Volgo-Viatskoe knizhnoe publ., 1973. 47 p.  
 [3] Barakhtanov L.V., Ershov V.I., Kuliashov A.P., Rukavishnikov S.V. *Snegokhodnye mashiny* [Snowmobile Machine]. Gor'kii, Volgo-Viatskoe knizhnoe publ., 1986. 191 p.  
 [4] Donato I.O., Zhuk V.A., Kuznetsov B.V., Kuliashov A.V., Shapkin V.A., Shcherbakov Yu.A. *Rotorno-vintovye mashiny. Osnovy teorii dvizheniia* [Rotary screw machine. Fundamentals of the theory of motion]. N. Novgorod, NPK publ., 2000. 451 p.  
 [5] Kosharnyi N.F. *Tekhniko-ekspluatatsionnye svoistva avtomobilei vysokoi prokhodimosti* [Technical and operational properties of all-terrain vehicles]. Kiev, Vysshiaia shkola publ., 1981. 208 p.  
 [6] Kuliashov A.P. *Spetsial'nye stroitel'no-dorozhnye mashiny s rotorno-vintovym dvizhitelem*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Special construction and road machines with rotary-screw propeller. Dr. tech. sci. diss.]. Gor'kii, 1986. 327 p.  
 [7] Shcherbakov Yu.V. *Razrabotka metodiki rascheta i vybor ratsional'nykh parametrov dvizheniia podvodnogo transportno-tekhnologicheskogo sredstva s rotorno-vintovym dvizhitelem*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of methods of calculation and choice of rational parameters of motion of an underwater freight technological tools with rotary-screw propeller. Cand. tech. sci. diss.]. N. Novgorod, NSTU publ., 2000. 167 p.

Статья поступила в редакцию 11.06.2013

### Информация об авторах

**НАУМОВ Валерий Николаевич** (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: tankist\_83@mail.ru).

**МАШКОВ Константин Юрьевич** (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**БЯКОВ Константин Евгеньевич** (Москва) — аспирант кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

### Information about the authors

**NAUMOV Valeriy Nikolaevich** (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of «Multi-Purpose Tracked Vehicles and Mobile Robots» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: tankist\_83@mail.ru).

**MASHKOV Konstantin Yur'evich** (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Multi-Purpose Tracked Vehicles and Mobile Robots» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).

**BYAKOV Konstantin Evgen'evich** (Moscow) — Post-Graduate of «Multi-Purpose Tracked Vehicles and Mobile Robots» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).