

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.29>**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРОГАНИЯ И ПРОДОЛЬНОГО МАНЕВРИРОВАНИЯ КВАНТОМОБИЛЯ**

Научная статья

Котиков Ю.Г.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0001-7532-7380;¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (cotikov[at]mail.ru)

Аннотация

Целью расчетного исследования явилась оценка динамики и устойчивости квантомобиля на этапах трогания и продольного маневрирования. Квантомобиль определен как наземное транспортное средство с гипотетическим квантовым двигателем (КД), обеспечивающим экипаж трастом (тягой), непосредственно прикладываемым к его корпусу. Методы включают рассмотрение баланса сил и моментов, формирование динамической Simulink-модели продольного движения квантомобиля. Модель учитывает влияние на продольную устойчивость положения центра приложения траста КД к корпусу экипажа, величины траста и его наклона, сопротивления качению опорных колес, факторов трения покоя опорных колес, аэродинамики корпуса экипажа и другое.

Результаты расчетов позволили оценить скоростную динамику экипажа совместно с динамикой изменения продольных опрокидывающих и стабилизирующих компенсационных моментов на этапах трогания и продольного маневрирования экипажа. Выявленные закономерности легли в основу конструктивных рекомендаций.

Продольная неуравновешенность квантомобиля и традиционного автомобиля в фазах трогания и маневрирования существенно отличаются. Размещение траста над опорной поверхностью приводит к возникновению питч-моментов, проявляющихся в разных условиях по-разному. Для нейтрализации опрокидывающих моментов на режимах трогания и маневрирования необходимы дополнительные трастеры, охватываемые единой системой управления с основным КД. Модель в целом может послужить как средством выработки конструктивных схем квантомобилей, так и оперативным решателем задействования дополнительных стабилизирующих трастеров на борту квантомобиля. В силу отсутствия сведений о подобных концептуальных исследованиях гипотетического квантомобиля, новизну работы можно считать существенной.

Ключевые слова: квантовый двигатель, квантомобиль, продольное движение, устойчивость, трогание, маневрирование, Simulink-модель.

A STUDY OF THE PROCESSES OF MOVING AND LONGITUDINAL MANOEUVRING OF A QUANTOMOBILE

Research article

Kotikov Y.G.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0001-7532-7380;¹ St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (cotikov[at]mail.ru)

Abstract

The aim of the computational study was to evaluate the dynamics and stability of the quantomobile at the stages of moving and longitudinal manoeuvring. Quantomobile is defined as a ground vehicle with a hypothetical quantum engine (QE) providing the crew with a tractive force (thrust) directly applied to its body. Methods include examining the balance of forces and moments and forming a dynamic Simulink model of the longitudinal motion of the quantomobile. The model takes into account the influence on the longitudinal stability of the position of the centre of application of the QE trust to the car body, the size of the trust and its inclination, rolling resistance of the support wheels, rest friction factors of the support wheels, aerodynamics of the car body, and others.

The results of the calculations made it possible to evaluate the speed dynamics of the crew together with the dynamics of changes in longitudinal overturning and stabilizing compensating moments at the stages of moving and longitudinal manoeuvring of the crew. The identified regularities formed the basis for design recommendations.

The longitudinal unbalance of a quantomobile and a conventional car in the moving and manoeuvring phases are significantly different. Placement of the trust over the supporting surface results in pitching moments that manifest themselves differently under different conditions. To neutralize the overturning moments in moving and manoeuvring modes, additional trasters are required, which are covered by a single control system with the main QE. The model as a whole can serve both as a means of working out design schemes of quantomobiles and as an operational solver of additional stabilizing trusters on board of a quantomobile. Due to the lack of information about similar conceptual studies of a hypothetical quantomobile, the novelty of the work can be deemed significant.

Keywords: quantum engine, quantomobile, longitudinal motion, stability, moving, manoeuvring, Simulink-model.

Введение

Начиная с Дирака [1], в физике развиваются идеи извлечения энергии из физического вакуума (ФВ) [2], [3], [4], [5]. На базе этих идей рассматриваются концепции квантовых двигателей (КД) [5], [6]. И хотя получаемые импульсы

траста (тяги) КД пока малы, надежда на практическую реализацию названных идей становится все более существенной [7].

Предположение, что физики задачу извлечения энергии ФВ решат успешно, а инженеры создадут конструкции КД, инициирует необходимость рассмотрения особенностей использования этого траста для движения транспортного средства (ТС).

КД по схеме воздействия на экипаж напоминает реактивный двигатель (РД). Однако в случае РД траст создается как реакция на импульс отбрасываемой массы отработавших газов, получая эту массу газов в качестве опоры. В случае же КД траст создается за счет деформации поля ФВ (пронизывающего и рабочую камеру КД, и окружающую окрестность и составляющего единое целое). Опора трасту обеспечивается наружной частью фрагмента поля, что представлено в трудах Леонова В.С. [5], [7]. Функционал рабочей камеры КД заключается в создании деформации пространства-времени, обеспечивающего за счет появляющегося градиента сил возникновение направленного траста.

Поскольку ориентированный траст КД непосредственно движет экипажем, трансмиссия становится ненужной, совокупность колес экипажа теряет функцию движителя – они остаются лишь опорными, ведомыми; трансмиссию можно изъять из конструкции ТС [5]. Вывешенный над опорной поверхностью (ОП) траст меняет схему сил и моментов, используемую для традиционного автомобиля. Точки возникновения сил тяги в пятнах контакта ведущих колес автомобилей переносятся в точки приложения вектора тяги КД к корпусу ТС [8], [9], [12], [13].

При возможности перевести вектор траста в наклонное положение можно за счет вертикальной составляющей этого вектора осуществлять прижим экипажа к ОП, либо его вывешивание (вплоть до отлета от ОП). Это видоизменяет схему сил и моментов традиционных наземных ТС [13].

Вывешивание (лифт) может привести к реализации режимов летательного аппарата (ЛА). Реализация прижимающей силы (антилифт) при входе экипажа в воду может позволить даже реализацию режима подводной лодки (ПЛ). Это приводит к идее всесреднего мультимодального квантомобиля (ВМК) [10], [11]. Часть из режимов ВМК отражена в работе [13]. Однако требуется значительная работа по заполнению совокупности априорных пока знаний по затрагиваемой проблеме.

Разница в величинах динамических нагрузок на колеса передней и задней осей экипажа, с точки зрения сохранения продольной устойчивости, для автомобиля имеет второстепенное значение – поскольку на его эксплуатационных режимах названные нагрузки воспринимаются встречными нормальными реакциями твердой ОП. В случае квантомобиля, однако, во-первых, при векторе траста, вывешенном над ОП, следует ожидать формирования значительного опрокидывающего момента (ОМ). Во-вторых, каким бы ни был этот ОМ, в отсутствие твердой опоры экипаж подвергнется вращательному движению в плоскости тангажа [14], [15], [16].

Оперативная нейтрализация ОМ для квантомобиля становится актуальной.

Эта актуальность заостряется на ОП с высоким сопротивлением качению (ОПВСК), особенно на режимах трогания и маневрирования ТС с КД.

Несмотря на второстепенность учета аэродинамических сил в формировании ОМ при троганиях и маневрах (по причине низких скоростей квантомобиля V_q в этих фазах), все же используем современный подход с привлечением статистики испытаний плохообтекаемых тел (ПОТ) (*bluff bodies*) [17], [18]. В качестве эталонного тела, ввиду предпочтительности рассмотрения движения по ОПВСК, выбран ПОТ 1-Вох, соответствующий автомобилю КамАЗ-4326 [16], [19] (рис. 1). В расчетах использованы конструктивные данные именно по этому грузовику.

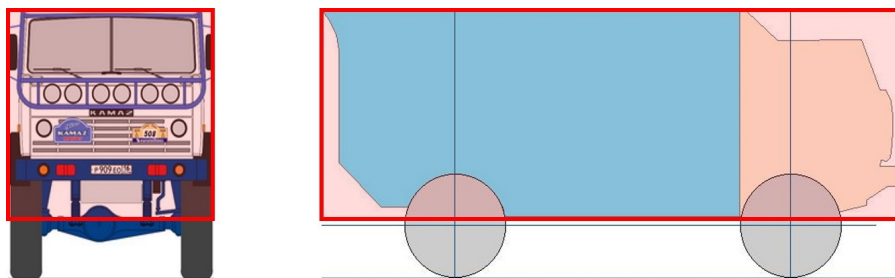


Рисунок 1 - Профили грузовика КамАЗ-4326 и ПОТ 1-Вох
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.29.1>

ПОТ 1-Вох, вместе с тем, может корреспондировать с множеством наземных машин: других грузовиков, мобильных контейнеров, строительно-дорожных машин, других средств, для которых главным является взаимодействие с ОПВСК. И поскольку вопросы эргономики (с неясными пока экологическими свойствами КД) здесь не стоят, допустим в качестве объекта исследования беспилотное ТС – дающее возможность установки КД (и основного, и дополнительных, корректирующих) в любом месте пространства этого ТС.

Методы и принципы исследования

2.1. Цель и задачи исследования

Целью расчетного исследования явилась оценка динамики и устойчивости квантомобиля на этапах его трогания и продольного маневрирования, главным образом, на ОПВСК.

Устранение трансмиссии, перенос движительных функций с опорных колес на траст КД, способность вектора траста действовать в плоскости тангажа, появление возможности осуществлять лифт и антилифт квантомобиля – всё

это, в отсутствие признанных теоретических основ движения квантомобиля и эмпирических данных, вызывает необходимость использовать подход с опорой на программное имитационное моделирование (ПИМ).

Задачами по достижению цели являются:

- 1) формирование математической модели продольного движения квантомобиля (МПДК) под поставленную цель;
- 2) построение Simulink-модели движения квантомобиля с детализацией трения покоя опорных колес, с обработкой интерфейса взаимодействия с моделью и вывода данных;
- 3) на базе Simulink-модели проведение ПИМ с экспериментами, охватывающими обоснованное множество вариантов движения;
- 4) обсуждение и обобщение результатов расчетов;
- 5) формирование рекомендаций и выводов.

2.2. Вектор траста и особенности его использования в МПДК

В рамках продольного движения экипажа в плоскости развёртывания угла тангажа β (см. рис. 2) вектор траста F_T раскладывается на две ортогональные компоненты F_{Tx} и F_{Tz} [8], [13]:

$$F_T = F_{Tx} + F_{Tz} \quad (1)$$

В скалярной записи это:

$$FT = \sqrt{FTx^2 + FTz^2} \quad (2)$$

Угол наклона вектора F_T

$$\beta = \arctg (F_{Tz}/F_{Tx}) \quad (3)$$

На рис. 2 квадрант I условно соответствует положительному направлению продольной тяговой силы, а квадрант II – отрицательному.

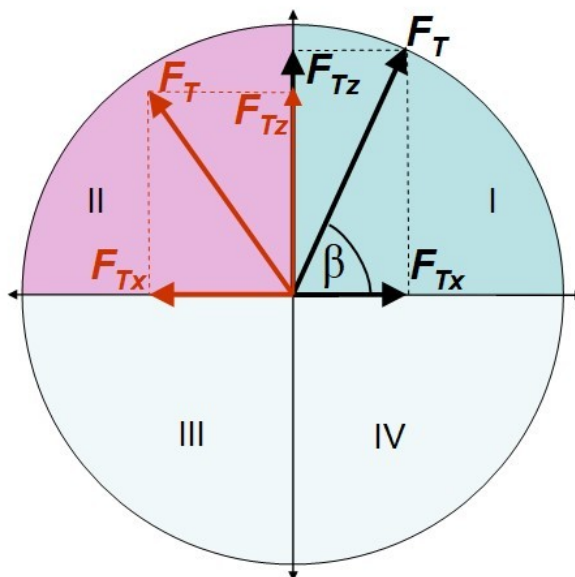


Рисунок 2 - Разложение вектора траста F_T на горизонтальную F_{Tx} и вертикальную F_{Tz} компоненты

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.29.2>

Примечание: β – угол наклона вектора F_T относительно горизонта

Ограничимся приземным (без отлета) движением квантомобиля по горизонтальной ОП ($0 \leq F_{Tz} + F_{wz} \leq G_q$, где F_{wz} – аэродинамическая подъемная сила, а G_q – вес экипажа). Освободимся от учета динамики вертикальных перемещений ТС. Будем рассматривать непосредственное приложение силы F_T к корпусу экипажа в его заданной конструктивной точке.

2.3. Силовой баланс квантомобиля

В качестве основы модели движения экипажа по горизонтальной ОП выбран следующий вариант уравнения баланса горизонтальных сил квантомобиля [8]:

$$F_{Tx} = F_r + F_{wx} + F_a = G'_q f_{k0} \left(1 + f_{kv} V_q^2 \right) + c_d \left(\frac{\rho_w}{2} \right) S_{fr} V_q^2 + \frac{G_q}{g} a \cdot (1 + \delta_{wh}), \quad (4)$$

где F_{Tx} – продольная сила тяги КвД (траст), Н;

F_r – сила сопротивления качению ведомых опорных колес, Н;

F_{wx} – сила сопротивления воздуха продольному движению (drag), Н;

F_a – сила инерции, противодействующая ускорению экипажа, Н;
 G_q' – сила давления экипажа на ОП с учетом общего лифта, Н;
 f_{k0} – коэффициент сопротивления качению колес при нулевой скорости;
 f_{kv} – скоростной коэффициент сопротивления качению колес, c^2/m^2 ;
 c_d – коэффициент аэродинамического сопротивления, безразмерный;
 ρ_w – плотность воздуха, $H \times c^2/m^4$;
 S_{fr} – лобовая площадь экипажа, m^2 ;
 G_q – исходный вес (сила тяжести) квантомобиля, Н;
 g – ускорение свободного падения, m/c^2 ;
 a – продольное ускорение экипажа, m/c^2 ;
 δ_{wh} – коэффициент инерции вращения опорных (ведомых) колес экипажа.

Сила $G_q' = G_q - F_{Tz} - F_{wz}$. Для квантомобиля приведенная масса $m' = G_q(1 + \delta_{wh})/g$ учитывает вращение только опорных колес, поскольку вращающиеся детали традиционного силового привода отсутствуют.

Отметим, что $F_r = F_{k0} + F_{rv}$, где $F_{k0} = f_{k0} \cdot G_q'$, а $F_{rv} = f_{kv} \cdot v_q^2 \cdot G_q'$.

График прикладываемых к экипажу сил отображен на рис. 3. Обозначены: V_q – вектор скорости движения квантомобиля; V_∞ – скорость невозмущенного набегающего потока воздуха ($|V_q| = |V_\infty|$ в отсутствие ветра); C_g – центр тяжести (ЦТ) экипажа; G_q – сила тяжести экипажа; F_a – приведенная сила инерции экипажа; C_{FT} – точка приложения траста КД к корпусу экипажа; F_T, F_{Tx} и F_{Tz} – сила тяги КвД (траст) и ее покоординатные компоненты; C_w – центр давления (ЦД) аэродинамических сил; F_w, F_{wx} и F_{wz} – сила воздействия воздуха и ее покоординатные компоненты; F_{f1} и F_{f2} – силы сопротивления качению передних и задних колес, соответственно; T_{f1} и T_{f2} – моменты сопротивления качению колес; h_{Fwx}, h_{FTx}, h_g – расстояния векторов соответствующих сил F_{wx}, F_{Tx}, F_a от ОП; l_{Fwz}, l_{FTz} – расстояния векторов соответствующих сил F_{wz}, F_{Tz} до вертикали от оси задних колес; l_0 – расстояние вектора силы F_{wz} до вертикали центра колесной базы; L_{wb}, L_1 и L_2 – расстояния базовое и от осей колес до проекции центра тяжести на ОП; A и B – центральные точки пятен контакта колес с ОП; R_{z1} и R_{z2} – нормальные реакции ОП.

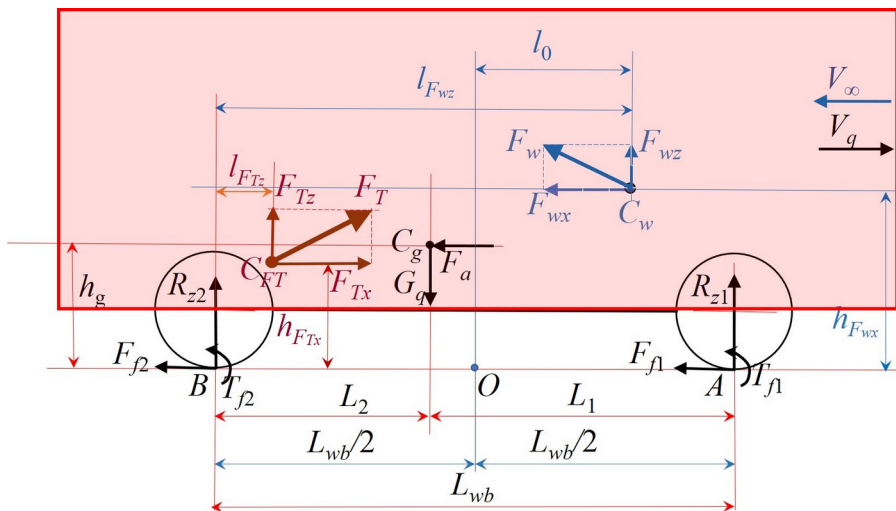


Рисунок 3 - Схема сил, действующих на квантомобиль
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.29.3>

Примечание: форма кузова –1-Вох [17], [18]

Силы воздействия воздуха F_{wx} и F_{wz} определяются с привлечением коэффициентов драга (c_d) и лифта (c_l) [15], [16].

2.4. Баланс моментов сил, действующих на квантомобиль

Баланс моментов сил детально рассмотрен в работе [13]. Приведем главное. Если начало связанной плоской системы координат разместить в точке B (назовем её СК_B – с осью x по направлению к передку экипажа, осью z вверх; положительными моментами – против часовой стрелки), то сумма всех моментов относительно точки B [13] (см. рис. 3):

$$\begin{aligned} \Sigma M_B = R_{z1}L_{wb} - G_qL_2 + T_{f1} + T_{f2} + F_{wx}h_{Fwx} + F_{wz}l_{Fwz} + F_a h_g \\ - F_{Tx}h_{FTx} + F_{Tz}l_{FTz} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Отметим, что сумма моментов (относительно точки B) определяет величину аэродинамического питч-момента (АПМ) и определенным образом связана с эмпирическим коэффициентом АПМ c_m (определяемым экспериментально на базе баланса моментов относительно точки O (см. рис. 3)). Этому уделено внимание в авторских работах [15], [16], и ввиду малых скоростей рассматриваемых фаз движения детализация связи может быть обойдена (например, путем зануления в исходных данных коэффициентов c_l и c_m).

Из уравнения (5) можно найти нормальную реакцию ОП R_{z1} .

Подобное уравнение относительно точки A позволяет найти реакцию R_{z2} . Опрокидывающий питч-момент $M_{\Sigma pm} = L_{wb}(R_{z1} - R_{z2})/2$. В статической постановке, если принять $R_{z2} = -R_{z1}$, можно записать $M_{\Sigma pm} = L_{wb}R_{z1}$.

Требуемый стабилизирующий момент (ТСМ) тогда равен $M_{st} = -M_{\Sigma pm}$. Для оценки значимости АПМ $M_{Fw} = M_{Fwx} + M_{Fwz}$ относительно ТСМ M_{st} введен коэффициент $K_{MFw.Mst} = M_{Fw}/M_{st}$.

2.5. Трение покоя колес при трогании и смене направления продольного возвратно-поступательного движения экипажа

Процесс трогания ведомого колеса подобен картине сухого трения [20]. Рассматриваем процесс без учета упругости и податливости элементов квантомобиля и ОП, а также скольжения колес – это позволяет линеаризовать модель трогания.

Чтобы вызвать качение ведомого колеса, к нему должно быть приложено толкающее усилие F_{kx} , необходимое для преодоления силы сопротивления сдвига покоящегося колеса. Для всех колес суммарно это: . Пока не достигнута эта величина – экипаж стоит (подвеска – условно жесткая). С другой стороны, в конце замедления ТС значение F_r момент остановки сбрасывается с величины F_{k0} до нуля.

Если экипаж меняет направление продольного движения на противоположное (и скорость проходит точку $V_x = 0$), то в момент остановки значение F_r сбрасывается до нуля, а затем наращивается до силы другого знака: $-F_{k0}$. Темп наращивания этой силы, а также момент страгивания колес зависит от величины тяговой силы F_{Tx} в этот период: при $|F_{Tx}| \geq |F_{k0}|$ движение колес (и экипажа) с наращиванием скорости начинается сразу, а при $|F_{Tx}| < |F_{k0}|$ движение колес отсутствует до момента выполнения равенства $|F_{Tx}| = |F_{k0}|$. В алгоритме реализовано задействование сил F_r , F_{k0} и F_{Tx} в условиях асинхронного изменения знака скорости.

2.6. Simulink-модель приземного движения квантомобиля (МПДК)

Структура имитационной системы состоит из четырех подсистем: Scenario – для формирования сценария исследования; расчета показателей динамики движения экипажа; расчета показателей энергетики; расчета нормальных реакций. Две базовые подсистемы МПДК: продольной динамики экипажа (*Vehicle Dynamics*), а также расчета нормальных реакций и питч-моментов (*NormReactions*) – представлены в авторских работах [14], [15].

Подсистемы оснащены множеством блоков визуализации. В подсистеме *NormReactions*, например, выходная информация собирается на 18-канальный осциллограф (распечатку выхода с него, например, см. ниже на рис. 4а и 7а).

Основные результаты

3.1. Подготовка и план расчетов

С целью количественной оценки динамики и продольной устойчивости квантомобиля посредством МПДК план расчетов охватил трогания и возвратно-поступательное маневрирование ТС, главным образом на ОПВСК.

Опорными значениями параметров выбраны данные автомобиля-прототипа КамАЗ-5326. При этом виртуально удалили из конструкции элементы трансмиссии и загладили днище – чем обеспечили снижение веса экипажа с 10 т до 8,8 т, а также условно обеспечили уровень $c_d = 0,32$ (соответствующий выкладкам работы [18] для 1-Вох). Задаваемые опорные параметры модели (см. (4)): $G_q = 88000$ Н; $L_{wb} = 4,25$ м; $S_{fr} = 8,415$ м²; $h_{FTx} = 1$ м; $l_{FTz} = 0,5$ м; $\delta_{wh} = 0,04$; $f_{k0} = 0,3$; $f_{kv} = 0,00037$ с²/м²; $c_d = 0,32$; $c_l = 0$; $c_m = 0$; $\rho_w = 1,225$ Н×с²/м⁴; $g = 9,81$ м/с²; $\beta = 0^\circ$. Максимальное значение траста $F_T = 90000$ Н: при угле $\beta = 77,9^\circ$ (максимальном в серии проведенных экспериментов ПИМ) оно обеспечивает полное вывешивание экипажа весом 88000 Н, оставляя $F_{Tx} = 18865$ Н на обеспечение горизонтального движения (в соответствии с (2) и (3), см. также детализированное обоснование в работах [9], [13]).

3.2. Трогание экипажа

Серия расчетов охватила перебор значений параметров: h_{FTx} , l_{FTz} , f_{k0} , β – каждый, как правило, на 6 уровнях. Базовыми значениями явились $h_{FTx} = 1$ м; $l_{FTz} = 0,5$ м; $f_{k0} = 0,3$; $c_d = 0,32$; $\beta = 0^\circ$. На рис. 4а приведена распечатка результатов по базовому варианту максимально интенсивного трогания. Первая секунда затрачивается на рост F_{Tx} до значения 90000 Н, на второй секунде он остается на этом уровне. На рис. 4б – динамика изменения силы сопротивления качению F_r при различных углах наклона β вектора траста F_T .

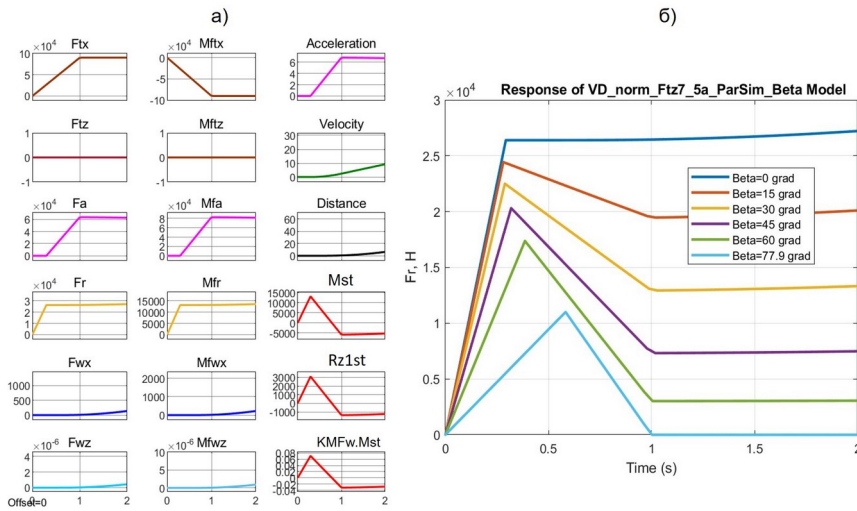


Рисунок 4 - Динамика изменения сил и моментов при трогании квантомобиля:
 а) графики изменения показателей движения (при базовых значениях параметров); б) изменения силы F_T при различных углах β вектора траста F_T
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.29.4>

На рис. 5а приведены результаты расчетов процесса изменения TCM M_{st} при различных значениях угла β , а на рис. 5б – результаты расчетов процесса изменения TCM M_{st} при различных значениях f_{k0} .

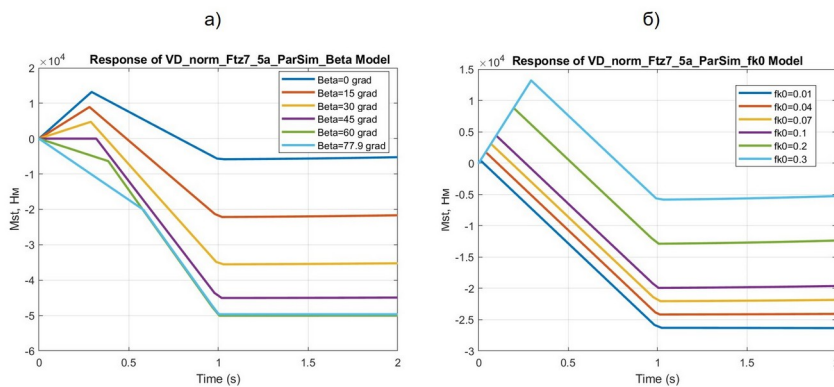


Рисунок 5 - Результаты расчетов процесса изменения TCM M_{st} при различных значениях β (а) и значениях f_{k0} (б)
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.29.5>

На рис. 6 приведены результаты расчетов процесса изменения TCM M_{st} при различных значениях h_{FTX} (а) и l_{FTz} (б). При этом на рис. 6а представлены кривые для горизонтального траста, а на рис. 6б – кривые для траста, действующего под углом $\beta = 45^\circ$.

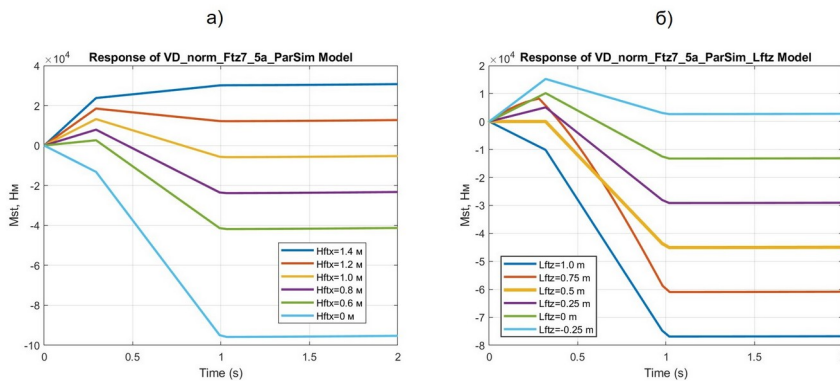


Рисунок 6 - Результаты расчетов процесса изменения TCM M_{st} при различных значениях h_{FTX} (а) и l_{FTz} (б)
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.29.6>

3.3. Продольное маневрирование

Продольное маневрирование – здесь возвратно-поступательное движение экипажа путем знакопеременной смены направления компоненты F_{Tx} задающего вектора траста.

Воспользуемся для анализа возможностями графического вывода пакета МПДК. Отметим разницу в задании темпа изменения траста F_{Tx} : если в случае исследования троганий (рис. 4÷6) темп был максимальный (90 кН/с), то при исследовании маневров (рис. 7–9) темп составлял $90/17,5 = 5,14$ кН/с.

На рис. 7а отражено изменение сил и моментов при изменении значений горизонтального траста F_{Tx} (при базовых значениях h_{FTx} , l_{FTz} , f_{k0} , c_d , β). На рис. 7б приведены графики изменения ТСМ M_{st} при маневрировании квантомобиля для разных значений коэффициента сопротивления качению колес f_{k0} (при остальных – базовых).

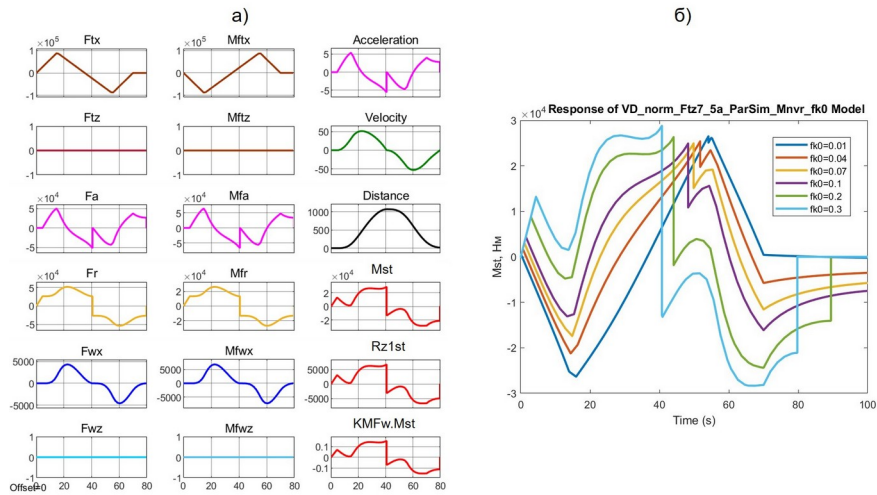


Рисунок 7 - Динамика сил и моментов при маневрировании:

а) распечатка продольного маневра на ОП с $f_{k0} = 0,3$; б) изменение M_{st} в серии маневров на ОП с различными f_{k0}
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.29.7>

На рис. 8 приведены результаты расчетов процесса изменения ТСМ M_{st} при различных значениях угла β (а) и коэффициента драга c_d (б).

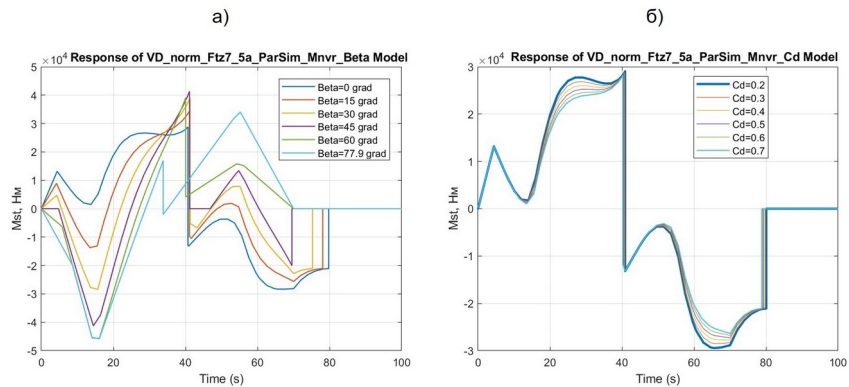


Рисунок 8 - Результаты расчетов процесса изменения ТСМ M_{st} при различных значениях угла β (а) и коэффициента драга c_d (б)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.29.8>

На рис. 9 приведены результаты расчетов процесса изменения ТСМ M_{st} при различных значениях h_{FTx} (а) и l_{FTz} (б).

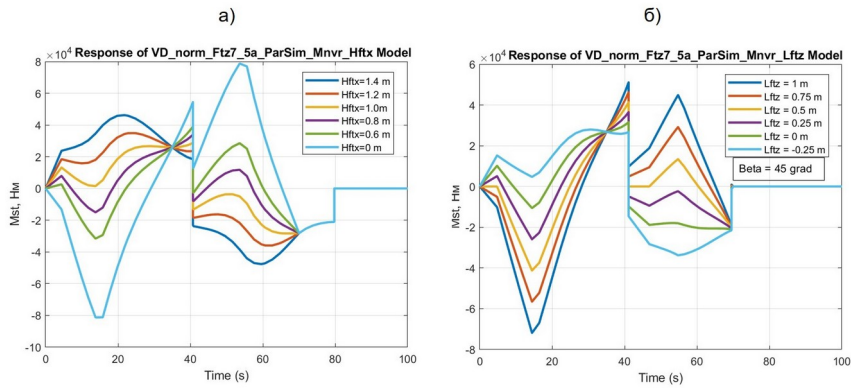


Рисунок 9 - Результаты расчетов процесса изменения TCM M_{st} при различных значениях h_{FTx} (а) и l_{FTz} (б)
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.29.9>

Обсуждение

Обсудим несколько ситуаций. Естественно ожидать наибольшей потери устойчивости в крайних точках конструктивных особенностей, тяжелых условиях движения, резкой смены режимов движения.

Начнем с трогания колес и экипажа. Рассматриваем трогание в крайне тяжелых дорожных условиях ($f_{k0} = 0,3$). Было задано изменение траста F_{Tx} : первая секунда – рост до 90000 Н (см. F_{Tx} на рис. 4а).

Видим, что при $\beta = 0$ ($F_{Tz} = 0$) для $F_{r0} = f_{k0} \cdot (G_q - F_{Tz}) = 0,3 \cdot 88000 = 26400$ Н трогание колес происходит в момент времени $t = 0,3$ с – по достижении $F_{Tx} = F_r = 26400$ Н (см. также на рис. 4б кривую для $\beta = 0$). В промежутке $0 < t \leq 0,3$ с. $F_r(t) = F_{Tx}(t)$, $F_w(t) = 0$, $F_d(t) = 0$ – и скорость, и ускорение равны нулю. Растущая сила $F_{Tx}(t)$ целиком идет на накопление силы страгивания колес. Возникающий отрицательный динамический опрокидывающий момент запрашивает положительный реактивный момент со стороны ОП $M_{st}(t)$ вплоть до 13000 Нм, соответственно реакция ОП на колеса передней оси $R_{z1st}(t)$ растет до 3000 Н (экипаж «клюет»).

В интервале $0,3 \text{ с} < t < 1 \text{ с}$ F_{Tx} растет до максимума 90000 Н. F_r растет медленно. Растут ускорение и скорость – благодаря увеличивающейся разнице сил ($F_{Tx} - F_r$). Величины момента $M_{st}(t)$ и силы $R_{z1st}(t)$ падают (из-за больших ускорений экипажа, приводящих при росте момента M_{Fa} к подъему передка экипажа); при $t = 0,8$ с $M_{st}(t)$ и $R_{z1st}(t)$ переходят в отрицательную область.

При росте угла β вектора траста (см. рис. 4б) растет F_{Tz} , что приводит к снижению F_{k0} (см. пики кривых на рис. 4б), а рост $F_{Tz}(t)$ в пределах $t < 1$ с способствует снижению величины F_r . Эта особенность отражается и на характере кривых $M_{st} = f(\beta)$ (см. рис. 5а).

Смена значений коэффициента f_{k0} приводит к пропорциональному изменению F_{r0} и $F_r(t)$, а также – к соответствующему характеру кривых $M_{st} = f(f_{k0})$ (см. рис. 5б).

Направленность зависимости частного опрокидывающего момента (ОМ) от высоты действия горизонтального вектора траста h_{FTx} очевидна – с уменьшением высоты и частный ОМ падает. Во взаимосвязи с другими составляющими общего ОМ создается TCM M_{st} , характер которого отражен на рис. 6а. Напомним, что уровень $h_{FTx} = 0$ конструктивно нереален для квантомобиля, но, однако, соответствует схеме создания тяги традиционного автомобиля. Видим, что M_{st} квантомобиля существенно отличается от M_{st} автомобиля, и может приобретать даже другую направленность (см. $h_{FTx} > 1,2$ м на рис. 6а).

Анализируя рис. 6а, отмечаем, что при $h_{FTx} > 1$ м во всей фазе трогания наблюдается «клевок» экипажа (и $M_{st} > 0$), а при $h_{FTx} < 1$ м передок напротив – приподнимается (и $M_{st} < 0$). При $h_{FTx} = 0$ (напомним, это условный уровень действия траста, соответствующий уровню возникновения тяговой силы ведущих колес классического автомобиля) требуемый момент для устранения опрокидывания экипажа назад достигает величины $M_{st} = -97000$ Нм.

Направленность частного ОМ зависит от того, где находится точка пересечения линии действия наклонного вектора траста F_T с ОП: спереди или сзади точки B на ОП (см. расположение точки C_{FT} на рис. 3). Это объясняет топологическое расщепление семейства кривых $M_{st} = f(l_{FTz})$ на рис. 6б на 2 группы: (в данном случае l_{FTz} до 0,5 м и после).

Перейдем к маневрам. На рис. 7а видим трогание колес при значении $F_r = F_{Tx} = 26400$ Н. Отмечаем, что несмотря на достижение трастом нулевого значения на 35-ой секунде, выход скорости на нуль происходит на 40-й секунде – при этом наблюдается переброс F_r от 26400 Н до -26400 Н. Этим объясняется ступенчатое изменение ускорения, силы F_a , а также M_{st} и R_{z1st} . Экипаж, пройдя вперед 1050 м, вернулся к концу маневра на нулевую позицию.

Семейство кривых $M_{st} = f(f_{k0}, t)$ (рис. 7б) отражает ожидаемую зависимость – с ростом f_{k0} растут и абсолютные значения ОМ. Рис. 7б также позволяет отметить отсутствие «зеркальности», как в характере (профиле), так и абсолютных значениях M_{st} на прямой и обратной ветвях маневра (объясняется отставанием динамики изменения скорости экипажа от динамики изменения задающего вектора $FTx(t)$).

Семейство кривых $M_{st} = f(\beta, t)$ на рис. 8а свидетельствует, во-первых, о возможности большого разброса ОМ и МСТ в зависимости от угла β , а во-вторых, отсутствии «зеркальности» M_{st} на прямой и возвратной ветвях маневра.

Семейство кривых $M_{st} = f(c_d, t)$ на рис. 8б свидетельствует о том, что при существенной разнице привлеченных значений c_d (от 0,2 до 0,7) разброс M_{st} наблюдался небольшим. Это объясняется тем, что в формировании M_{st} преобладающую долю вносит большое дорожное сопротивление ($f_{k0} = 0,3$), на фоне которых аэродинамические флуктуации малозначимы.

Особенности, проявившиеся на маневрах с изменением высоты действия траста h_{FTx} :

- 1) с приближением к $h_{FTx} = 0$ («автомобильный» вариант) передок экипажа (по ходу движения) все больше задирается (ТСМ M_{st} должен быть направлен на его сдерживание);
- 2) в момент перекладки направления траста F_{Tx} (рис. 9а) ТСМ M_{st} – ощутим (25000 Нм): из-за действующих в движении сопротивлений F_r и F_a ;
- 3) в момент перекладки направления скорости (см. $t = 40$ с на рис. 7а) наблюдается резкая смена знака и величины M_{st} ;
- 4) из-за инерционности и диссипативных потерь движущегося ТС «зеркальности» графиков на ветвях маневра не наблюдается.

Утверждение о влиянии точки пересечения линии действия наклонного траста F_T с ОП (спереди или сзади точки В) на направленность частного ОМ остается в силе и для случая маневрирования. Однако заметим, что в силу непрерывности зависимости частного ОМ от l_{FTx} поверхность $M_{st} = f(l_{FTx}, t)$ в пределах однонаправленной части маневра будет непрерывной (рис. 9а). При перекладке направления скорости движения, естественно, будет наблюдаться функциональный разрыв, как и во всех случаях с привлеченными здесь параметрами.

Совокупность проведенных расчетных экспериментов позволяет сделать следующие количественные выводы:

А. При троганиях и возвратно-поступательных маневрах квантомобиля можно ожидать значительных абсолютных ОМ $M_{\Sigma pm}$: для ТС с данными КамАЗ-4326 при троганиях в пределах $-60 \text{ кНм} < M_{\Sigma pm} < 15 \text{ кНм}$; при маневрах $-40 \text{ кНм} < M_{\Sigma pm} < 40 \text{ кНм}$. С учетом того, что $M_{\Sigma pm} / L_{wb} = R_{z1}$, можно записать: для троганий $-14 \text{ кН} < R_{z1} < 3,5 \text{ кН}$; а для маневров $-9,5 \text{ кН} < R_{z1} < 9,5 \text{ кН}$. Если выразить эти неравенства в долях величины приложенного траста, т.е. $R_{z1} / F_T = \rho_{z1}$, то получим (при $F_T = 90 \text{ кН}$): для троганий: $-0,15 < \rho_{z1} < 0,04$; для маневров: $-0,1 < \rho_{z1} < 0,1$.

Б. Для возвратно-поступательных маневров перепад значений $M_{\Sigma pm}$ при перекладке направления траста и скорости движения достигает $\Delta M_{\Sigma pm} = 40 \text{ кНм}$, это соответствует броску ρ_{z1} силовой нагрузки $\Delta R_{z1} = 9,5 \text{ кН}$, что в долях к приложенному трасту составляет $\Delta \rho_{z1} \approx 0,1$.

На значения величин R_{z1} , ΔR_{z1} , ρ_{z1} и $\Delta \rho_{z1}$ должны ориентироваться разработчики при установке стабилизирующих трастеров в зоне оси передних колес. При установке в других зонах ТС, естественно, нужно заменять L_{wb} другими величинами. Также естественно, что численные рекомендации будут иными при других конструктивных параметрах экипажа.

Заключение

Основными факторами, усугубляющими проблему устойчивости квантомобиля, в сравнении с классическим автомобилем, являются возникновение и реализация тяговой силы (траста) над опорной поверхностью (ОП), а также возможность вывешивания экипажа над ОП, что усиливает динамику движения в плоскости тангажа и увеличивает опасность опрокидывания. Многофакторные расчеты позволили оценить значимость этой проблемы.

Simulink-модель приземного движения квантомобиля (МПДК), созданная на базе рассмотрения схемы сил и моментов, действующих на ТС с квантовым двигателем (КД), привлечения математических моделей трогания и движения экипажа, позволила провести расчетное исследование динамики продольного движения квантомобиля при троганиях и продольных маневрах с фиксацией опрокидывающих моментов (ОМ) и требуемых стабилизирующих моментов (ТСМ) для нейтрализации ОМ.

Для нейтрализации опрокидывающих моментов на режимах трогания и маневрирования необходимы дополнительные трастеры, охватываемые единой системой управления с основным КД.

Сформированные на базе программы МПДК методические положения оценки продольной устойчивости квантомобиля могут послужить основой расчетной оптимизации компоновок этого вида ТС, расположения силовых модулей (трастеров) и их задействования в процессе движения.

Модель в целом может послужить как средством выработки конструктивных схем квантомобилей, так и оперативным решателем задействования дополнительных стабилизирующих трастеров на борту квантомобиля.

МПДК можно рассматривать как важную компоненту структуры дальнейших исследований функционирования квантомобиля средствами Matlab-Simulink и подобных пакетов прикладных программ.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Маняшин А.В., Тюменский Индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.29.10>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Manyashin A.V., Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.29.10>

Список литературы / References

1. Dirac P.A.M. The Principles of Quantum Mechanics / P.A.M. Dirac. — Clarendon Press, 1947. — 312 p.
2. Puthoff H. Extracting Energy and Heat from the Vacuum / H. Puthoff // Physical Review E. — 1993. — Vol. 48. — № 2. — P. 1562-1565. — URL: http://www.earthtech.org/publications/PREv48_1562.pdf (accessed: 01.03.2024).
3. Shawyer R. An Emdrive Thruster for Cubesats / R. Shawyer // 71st International Astronautical Congress 2020. — 2020. — URL: <https://iafastro.directory/iac/paper/id/56845/abstract-pdf/IAC-20,C4,6,9,x56845.brief.pdf?2020-07-07.11:16:18> (accessed: 01.03.2024).

4. Tajmar M. High-Accuracy Thrust Measurements of the Emdrive and Elimination of False-Positive Effects / M. Tajmar, O. Neunzig, M. Weikert // *Space Propulsion 2020+1* (March 17-19, 2021). — 2021. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/350108418> (accessed: 01.03.2024).
5. Leonov V.S. Quantum Energetics. Vol. 1. Theory of Superunification / V.S. Leonov. — Cambridge International Science Publ., 2010. — 745 p. — URL: https://www.researchgate.net/publication/354340919_Quantum_Energetics_Volume_1_Theory_of_Superunification_2010 (accessed: 01.03.2024).
6. Пат. 2185526 Российская Федерация, МПК F 03 H 5/00. Способ создания тяги в вакууме и полевой двигатель для космического корабля (варианты) / Леонов В.С.; патентообладатели Леонов В.С., Пилкин В.Е. — № 2001113320/06; заявл. 21.05.2001; опубл. 20.07.2002, Бюл. № 20. — 60 с. — URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2185526C1_20020720?usclid=ljolp35y5g195867225 (дата обращения: 01.03.2024).
7. Леонов В.С. Неракетный нереактивный квантовый двигатель: технология, результаты, перспективы / В.С. Леонов, О.Д. Бакланов, М.В. Саутин и др. // *Воздушно-космическая сфера*. — № 1. — 2019. — С. 68-75. — DOI: 10.30981/2587-7992-2019-98-1-68-75.
8. Котиков Ю.Г. Квантомобиль: исследование формирования и приложения тяговой силы / Ю.Г. Котиков // *Вестник гражданских инженеров*. — № 4 (69). — 2018. — СПб.: СПбГАСУ. — С. 164–174. — DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-4-189-198.
9. Kotikov Ju. Specifics of the Quantomobile Force Balance / Ju. Kotikov // *Architecture and Engineering*. — Volume 4, Issue 1. — P. 3–10. — DOI: 10.23968/2500-0055-2019-4-1-3-10.
10. Котиков Ю.Г. Квантомобиль как всесреднее транспортное средство / Ю.Г. Котиков // *Вестник гражданских инженеров*. — 2020. — № 4 (81). — С. 182-188. — DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-4-182-188
11. Котиков Ю. Г. Использование свойств транспортных средств в концепте всесреднего мультимодального квантомобиля / Ю. Г. Котиков // *Вестник гражданских инженеров* *Вестник гражданских инженеров*. — 2020. — № 6 (83). — С. 195-205. — DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-6-195-205
12. Kotikov Yu. The Rise of the Quantomobile Theory / Yu. Kotikov // *Architecture and Engineering*. — 2020. — Vol. 5. — Iss. 4. — P. 74-81.
13. Котиков Ю.Г. Основы теории квантомобиля / Ю.Г. Котиков. — СПб: СПбГАСУ, 2021. — 210 с. — DOI: 10.23968/978-5-9227-1142-5-2021-1-253.
14. Котиков Ю.Г. Расчетное исследование продольной устойчивости квантомобиля / Ю.Г. Котиков // *Вестник гражданских инженеров*. — 2023. — № 1 (96). — С. 122–131. — DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-1-122-131.
15. Котиков Ю.Г. Оценка продольной устойчивости квантомобиля на базе показателей аэродинамики автомобиля-аналога / Ю.Г. Котиков // *Международный научно-исследовательский журнал*. — 2023. — №10 (136). — URL: <https://research-journal.org/archive/10-136-2023-october/10.23670/IRJ.2023.136.24> (дата обращения: 01.03.2024). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.136.24.
16. Котиков Ю.Г. Прогнозирование устойчивости квантомобиля с привлечением материалов испытаний эталонных аэродинамических моделей автомобилей / Ю.Г. Котиков // *Международный научно-исследовательский журнал*. — 2024. — №2 (140). — URL: <https://research-journal.org/archive/2-140-2024-february/10.23670/IRJ.2024.140.38> (дата обращения: 01.03.2024). — DOI: 10.23670/IRJ.2024.140.38.
17. Newnham P.S. The Influence of Turbulence on the Aerodynamic Optimization of Bluff Body Road Vehicles: dis. ... of PhD / P.S. Newnham. — Loughborough University, 2014. — 187 p. — URL: <https://hdl.handle.net/2134/14381> (accessed: 01.03.2024).
18. Perry A.K. An Investigation into the Base Pressure of Simplified Automotive Squareback Geometries: dis. ... of PhD / A.K. Perry. — Loughborough University, 2016. — 221 p. — URL: <https://hdl.handle.net/2134/22605> (accessed: 01.03.2024).
19. Карабцев В.С. Аэродинамика плохообтекаемых тел и возможности ее применения при проектировании грузовых автомобилей / В.С. Карабцев, Д.Х. Валеев // *Механика машин, механизмов и материалов*. — 2011. — №4 (17). — С. 97-102.
20. Baruh N. Applied Dynamics / N. Baruh. — CRC Press. — 2015. — 838 p. — ISBN-13: 978-1-4822-5079.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Dirac P.A.M. The Principles of Quantum Mechanics / P.A.M. Dirac. — Clarendon Press, 1947. — 312 p.
2. Puthoff H. Extracting Energy and Heat from the Vacuum / H. Puthoff // *Physical Review E*. — 1993. — Vol. 48. — № 2. — P. 1562-1565. — URL: http://www.earthtech.org/publications/PREv48_1562.pdf (accessed: 01.03.2024).
3. Shawyer R. An Emdrive Thruster for Cubesats / R. Shawyer // 71st International Astronautical Congress 2020. — 2020. — URL: <https://iafastro.directory/iac/paper/id/56845/abstract-pdf/IAC-20,C4,6,9,x56845.brief.pdf?2020-07-07.11:16:18> (accessed: 01.03.2024).
4. Tajmar M. High-Accuracy Thrust Measurements of the Emdrive and Elimination of False-Positive Effects / M. Tajmar, O. Neunzig, M. Weikert // *Space Propulsion 2020+1* (March 17-19, 2021). — 2021. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/350108418> (accessed: 01.03.2024).
5. Leonov V.S. Quantum Energetics. Vol. 1. Theory of Superunification / V.S. Leonov. — Cambridge International Science Publ., 2010. — 745 p. — URL: https://www.researchgate.net/publication/354340919_Quantum_Energetics_Volume_1_Theory_of_Superunification_2010 (accessed: 01.03.2024).
6. Pat. 2185526 Russian Federation, Int. Cl. F 03 H 5/00. Sposob sozdaniya tyagi v vakuume i polevoy dvigatel' dlya kosmicheskogo korablya (varianty) [Method of vacuum thrust generation and field engine for spacecraft (variants)] / Leonov

V.S.; patentees Leonov V.S, Pilkin V.E. — № 2001113320/06; appl. 21.05.2001; publ. 20.07.2002, Bul. № 20. — 60 p. — URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2185526C1_20020720?ysclid=ljolph35y5g195867225 (accessed: 01.03.2024). [in Russian]

7. Leonov V.S. Neraketnyj nereaktivnyj kvantovyj dvigatel': tehnologija, rezul'taty, perspektivy [Non-Rocket Non-Reactive Quantum Engine: Idea, Technology, Results, Prospects] / V.S. Leonov, O.D. Baklanov, M.V. Sautin et al. // *Vozdushno-kosmicheskaja sfera* [Aerospace sphere]. — 2019. — № 1. — P. 68-75. — DOI: 10.30981/2587-7992-2019-98-1-68-75 [in Russian]

8. Kotikov Ju. G. Kvantomobil': issledovanie formirovaniya i prilozheniya tyagovoy sily [Quantomobile: research of formation and imposition of thrust] / Ju.G. Kotikov // *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. — 2018. — no. 4 (69). — p. 189–198. — DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-4-189-198. [in Russian]

9. Kotikov Ju. Specifics of the Quantomobile Force Balance / Ju. Kotikov // *Architecture and Engineering*. — Volume 4, Issue 1. — P. 3–10. — DOI: 10.23968/2500-0055-2019-4-1-3-10.

10. Kotikov Ju.G. Kvantomobil' kak vsesrednoe transportnoe sredstvo [Quantomobile as a multienvironment vehicle] / Ju.G. Kotikov // *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. — 2020. — № 4 (81). — p. 182–188. — DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-4-182-188 [in Russian]

11. Kotikov Ju.G. Ispol'zovanie svoystv transportnykh sredstv v kontsepte vsesrednogo mul'timodal'nogo kvantomobilya [Using the properties of vehicles in the concept of the multi-environment multi-modal quantomobile] / Ju.G. Kotikov // *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. — 2020. — no. 6 (83). — p. 195–205. — DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-6-195-205

12. Kotikov Yu. The Rise of the Quantomobile Theory / Yu. Kotikov // *Architecture and Engineering*. — 2020. — Vol. 5. — Iss. 4. — P. 74-81.

13. Kotikov Yu.G. Osnovy teorii kvantomobilya [Fundamentals of the Quantomobile Theory] / Yu.G. Kotikov. — St. Petersburg: SPbSUACE, 2021. — 210 p. — DOI: 10.23968/978-5-9227-1142-5-2021-1-253. [in Russian]

14. Kotikov Yu.G. Raschetnoe issledovanie prodol'noj ustojchivosti kvantomobilja [Computational Research of The Quantomobile Longitudinal Stability] / Yu.G. Kotikov // *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. — 2023. — № 1(96). — P. 122-131. — DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-1-122-131. [in Russian]

15. Kotikov Y.G. Otsenka prodol'noj ustojchivosti kvantomobilja na base pokasatelej aerodinamiki avtomobilja-analoga [An Evaluation of Longitudinal Stability of the Quantum Car Based on Aerodynamic Parameters of the Analogue One] / Yu.G. Kotikov // *Mezhdunarodnyy Nauchno-Issledovatel'skiy Zhurnal* [Research Journal of International Studies]. — 2023. — №10 (136). — URL: <https://research-journal.org/archive/10-136-2023-october/10.23670/IRJ.2023.136.24> (accessed: 20.12.2023). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.136.24. [in Russian]

16. Kotikov Y.G. Prognozirovanie ustojchivosti kvantomobilja s privlecheniem materialov ispytaniy jetalonnih ajerodinamicheskikh modelej avtomobilej [Prediction of Quantomobile Stability with Test Materials of Reference Aerodynamic Models of Automobiles] / Yu.G. Kotikov // *Mezhdunarodnyy Nauchno-Issledovatel'skiy Zhurnal* [Research Journal of International Studies]. — 2024. — №2 (140). — URL: <https://research-journal.org/archive/2-140-2024-february/10.23670/IRJ.2024.140.38> (accessed: 01.03.2023). — DOI: 10.23670/IRJ.2024.140.38. [in Russian]

17. Newnham P.S. The Influence of Turbulence on the Aerodynamic Optimization of Bluff Body Road Vehicles: dis. ... of PhD / P.S. Newnham. — Loughborough University, 2014. — 187 p. — URL: <https://hdl.handle.net/2134/14381> (accessed: 01.03.2024).

18. Perry A.K. An Investigation into the Base Pressure of Simplified Automotive Squareback Geometries: dis. ... of PhD / A.K. Perry. — Loughborough University, 2016. — 221 p. — URL: <https://hdl.handle.net/2134/22605> (accessed: 01.03.2024).

19. Karabtsev V.S. Aerodinamika plohoobtekaemyh tel i vozmozhnosti ejo primenenija pri proektirovanii gruzovyh avtomobilei. Analiticheskij obzor [Aerodynamics of bluff bodies and the possibility of its application in the design of trucks. Analytical Review] / V.S. Karabtsev, D.H. Valeev // *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials]. — 2011. — №4 (17). — P. 97-102. [in Russian].

20. Baruh H. *Applied Dynamics* / H. Baruh. — CRC Press. — 2015. — 838 p. — ISBN-13: 978-1-4822-5079.