

ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА/OPERATION OF ROAD TRANSPORT

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.38>

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КВАНТОМОБИЛЯ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ МАТЕРИАЛОВ ИСПЫТАНИЙ ЭТАЛОННЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ

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 исследования явилось прогнозирование устойчивости квантомобиля (транспортного средства с квантовым двигателем (КД)) с привлечением материалов испытаний эталонных аэродинамических моделей автомобилей на основе плохообтекаемых тел (ПОТ). Методы включают: рассмотрение силового баланса квантомобиля, баланса моментов сил; учет особенностей сил воздействия воздуха; адаптацию результатов испытаний ПОТ к моделированию квантомобиля. С учетом целевых установок модернизирована авторская Simulink-модель приземного движения квантомобиля (МПДК). Сформировано кусочно-линейное представление динамики изменения аэродинамических коэффициентов при изменении числа Рейнольдса Re и скорости тела V . Основными оценочными показателями устойчивости явились значения продольного опрокидывающего момента. Результаты расчетов, проведенные на базе привлеченных весовых и геометрических данных по автомобилю-прототипу КамАЗ-5326, а также оппозитных ПОТ 1-Box и Davis, охватывают серии разгонов и установившегося движения микро- и макромоделей квантомобилей. Варьируемые параметры: величина траста, высотная координата точки приложения траста к корпусу экипажа, коэффициент сопротивления движению опорных колес, коэффициенты аэродинамического воздействия. Представлена совокупность графиков, характеризующих зависимость оценочных показателей от названных параметров в процессе реализации множества режимов движения. Результаты расчетов позволили оценить динамику возникновения и изменения продольных опрокидывающих пич-моментов и моментов, требуемых для стабилизации экипажа. Выводы. Продольная неуравновешенность квантомобиля отличается от таковой для автомобиля. Вывешивание траста над опорной поверхностью приводит к возникновению пич-моментов, проявляющихся в разных условиях по-разному. Выбор оппозитных ПОТ позволил оценить значения показателей устойчивости как граничные. Для нейтрализации опрокидывающих моментов необходимы дополнительные трастеры и/или специальные аэродинамические средства, охватываемые единой системой управления с основным КД. S-модель может послужить оперативным решателем задействования конструктивных стабилизирующих элементов на борту квантомобиля. Новизну работы можно считать существенной, в силу отсутствия сведений о подобных концептуальных исследованиях гипотетического квантомобиля.

Ключевые слова: квантовый двигатель, квантомобиль, продольное движение, устойчивость, аэродинамика, плохообтекаемое тело, Simulink-модель.

PREDICTION OF QUANTOMOBILE STABILITY WITH TEST MATERIALS OF REFERENCE AERODYNAMIC MODELS OF AUTOMOBILES

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 study was to predict the stability of a quantum car (a vehicle with a quantum motor (QM)) using the materials of tests of reference aerodynamic models of automobiles based on high-drag bodies (HDBs). The methods include: examination of the force balance of the quantomobile, the balance of force moments; taking into account the features of the air impact forces; adaptation of the HDBs test results to the modelling of the quantomobile. The author's Simulink model of the ground motion of the quantomobile (MPDC) is modernized, taking into account the target settings. A piecewise linear representation of the dynamics of the aerodynamic coefficients' variation under changing Reynolds number Re and body velocity V is generated. The main stability estimators were the values of the longitudinal overturning moment. The results of calculations carried out on the basis of weight and geometric data on the prototype KamAZ-5326 vehicle, as well as opposition HDBs 1-Box and Davis, cover a series of acceleration and steady-state motion of micro- and macromodels of quantum cars. Varying parameters: trust magnitude, altitude coordinate of the point of trust application to the crew body, drag coefficient of the supporting wheels, aerodynamic influence coefficients. A set of graphs characterizing the dependence of estimated indicators on the named parameters in the process of implementation of a set of driving modes is presented. The results of the calculations allowed to evaluate the dynamics of occurrence and changes in longitudinal overturning pitching moments and moments required for crew stabilization. Conclusions. The longitudinal unbalance of a quantomobile is different from that of a motor vehicle. Suspension of the trust over the supporting surface results in pitching moments that manifest themselves

differently under different conditions. The choice of oppositional HDBs allowed to estimate the values of stability indices as boundary values. To neutralize the overturning moments, additional tracers and/or special aerodynamic aids are required, covered by a single control system with the main FC. The S-model can serve as an operational solver of the engagement of structural stabilizing elements on board the quantomobile. The novelty of the work can be regarded as significant, due to the lack of information on similar conceptual studies of a hypothetical quantomobile.

Keywords: quantum engine, quantum automobile, longitudinal motion, stability, aerodynamics, high-drag body, Simulink model.

Введение

В последние десятилетия в физике развиваются идеи извлечения энергии из физического вакуума (ФВ) [1], [2], [3], [4], [5]. На базе этих идей рассматриваются концепции квантовых двигателей (КД), способных найти применение на транспорте [5], [6], [7]. Имеются сведения о лабораторных образцах КД [6], [7]. Предположение, что усилия физиков и инженеров завершатся успешным извлечением энергии ФВ посредством работоспособных конструкций КД, инициирует необходимость рассмотрения особенностей использования траста КД для движения транспортного средства (ТС).

Основная функциональная особенность ТС с КД заключается в том, что КД, создавая направленный траст, способен обеспечить ТС тяговой силой, прикладываемой непосредственно к корпусу экипажа, исключая этим необходимость трансмиссии. Это подобно воздействию на экипаж ракетного двигателя (РД), однако в отличие от РД (где траст создается как реакция на импульс отбрасываемой массы газов), КД создает траст за счет деформации поля ФВ, обеспечивая опору траста во внешней части задействованного фрагмента поля ФВ [5], [6], [7]. Функция рабочей камеры КД заключается в создании деформации пространства-времени [5], обеспечивающего за счет появляющегося градиента сил возникновение направленного траста [7]. При этом траст, благодаря отсутствию продуктов горения в его тыльной части, получит конструктивную возможность шарнирного обметания пространства с фиксацией любых пространственных углов. Отличием КД от РД является также отсутствие необходимости содержания на борту запаса топлива.

Квантовый Двигатель является одновременно и Движителем, что может служить основанием введения для всей силовой установки ТС с КД аббревиатуры КДД (Квантовый Двигатель–Движитель). Автором в ряде работ рассмотрены концепции функционирования КДД. Для ТС с КДД введен термин квантомобиль [8], рассмотрены возможные режимы движения квантомобиля [9], [10], [11], сформированы концептуальные основы теории квантомобиля [12], [13], рассмотрена возможность создания всесреднего мультимодального квантомобиля (ВМК) [11], [12], [13].

Изъятие трансмиссии из конструкции ТС, при наличии КДД, высвобождает колеса экипажа от функции движителя, они остаются лишь опорными. Вывешенный над опорной поверхностью (ОП) траст меняет схему сил и моментов, используемую для классического автомобиля. Точки возникновения сил тяги в пятнах контакта ведущих колес автомобилей переносятся и трансформируются в точки приложения вектора тяги КД к корпусу ТС [8], [13]. При наличии возможности обеспечения наклона вектора траста появляется возможность вывешивания экипажа (лифт), либо его прижимания к ОП (антилифт). При всём этом заостряется проблема продольной устойчивости [14], [15].

Разница в величинах вертикальных нагрузок на колеса экипажа, с точки зрения продольной устойчивости, для автомобиля в большинстве случаев имеет второстепенное значение – поскольку при движении автомобиля названные нагрузки отражаются реакциями твердой ОП. В случае квантомобиля, однако, во-первых, из-за отсутствия ограничений по сцеплению колес с ОП возможна реализация тяговой силы, значительно превосходящей допустимую для автомобиля. Во-вторых, траст, вывешенный над ОП, формирует составляющую опрокидывающего момента, отсутствующую в автомобильном варианте. В-третьих, в отсутствие твердой опоры вывешенный квантомобиль получит склонность к вращательному движению в плоскости тангенса [13].

В последнее время в практике исследования аэродинамики автомобиля сложился методологический подход, основой которого является идея покрытия множества реальных форм экипажей некоторой совокупностью упрощенных плохообтекаемых тел (ПОТ) (*Simplified bluff body* [16], [19], [21], [25], [27]), каждое из которых представляет тот или иной класс ТС. Усилия научных коллективов концентрируются на исследованиях аэродинамики разномасштабных моделей этих упрощенных тел, внося вклад в общий прогресс этой области науки и техники. Отметим некоторые из утверждившихся ПОТ: 1-Box [17], [18], 2-Box [17], [18], Ahmed [19], Windsor [20], Docton [21], Davis [25], [26] и др. Накопленный таким образом материал позволяет исследователям оценивать аэродинамические характеристики перспективных моделей автомобилей, близких по геометрическим пропорциям и профилю к тому или иному ПОТ. Получаемые оценки служат выработке рекомендаций и решений по обводам корпусов, жесткому и выдвигаемому оперению экипажей, реализации оптимальных режимов движения [23].

В русле затронутого подхода велика роль масштабирования. Разномасштабность моделей требует привлечения (в качестве критерия адекватности условий моделирования) чисел Рейнольдса [16], [17], [18], [24] (возможно, и чисел Маха и Строхала [24] – для высоких скоростей), на базе которых определяются скоростные режимы как натурных испытаний, так и расчетных моделей автомобилей. Изложенный подход привлекателен и для построения аэродинамических портретов гипотетических ТС с КДД.

Следует отметить, что гибридное получение аэродинамических показателей на базе экспериментального и алгоритмического разнообразия: испытаний полноатурных и масштабных моделей, конструктивного различия стендов, способов моделирования дорожного сопротивления, математических и цифровых моделей, практики и качества обработки данных, прочее [22], [24] – не может предъявлять высоких требований к точности прогнозных оценок для таких гипотетических объектов, как квантомобиль. Тем не менее считаем, что исследование в методическом ключе будет оправданным.

Гипотезой исследования считаем, что разница показателей продольной устойчивости не только между различными конфигурациями квантобилей, но и между квантобилями и их автомобилями-аналогами, будет существенной.

Данная статья, являясь логическим продолжением публикации [15], отражает углубление представлений о продольной устойчивости квантобиля на базе названных методов с использованием ПОТ.

Методы и принципы исследования

2.1. Цель и задачи исследования

Целью исследования обозначили прогнозирование продольной устойчивости квантобиля с привлечением материалов испытаний ПОТ автомобилей.

Устранение трансмиссии, перенос движительных функций с опорных колес на траст КД, способность вектора траста действовать в плоскости тангажа, – всё это, в отсутствие признанных теоретических основ движения квантобиля 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 квантобиля (МПДК) под поставленную цель;
- 2) построение Simulink-модели движения квантобиля – с детализацией скоростных аэродинамических характеристик, с охватом имитации стендовых аэродинамических испытаний и дорожного движения; с отработкой интерфейса взаимодействия с моделью и вывода данных;
- 3) на базе Simulink-модели проведение ряда ПИМ, покрывающего некоторое множество конфигураций кузова квантобиля и вариантов его движения;
- 4) обсуждение и обобщение результатов расчетов;
- 5) формирование рекомендаций и выводов.

2.2. Вектор траста и особенности его использования в МПДК

Несмотря на имеющиеся публикации автора по концепциям механики ТС с КДД [8], [10], [11], [12], [13], ниже для усиления самодостаточности восприятия статьи приведем исходные позиции МПДК.

В рамках продольного движения экипажа в плоскости разворота угла тангажа β вектор траста \mathbf{F}_T раскладывается на две ортогональные компоненты F_{Tx} и F_{Tz} [8]:

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

Ограничимся приземным (без отлета) движением квантобиля 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 \mathbf{F}_T к корпусу экипажа в его заданной конструктивной точке.

В данной статье будем рассматривать только лишь горизонтальный вариант реализации траста КД – ради прозрачности использования материалов испытаний ПОТ (способных генерировать и свой лифт, и антилифт).

2.3. Баланс сил и силовых моментов квантобиля

Используем уравнение баланса горизонтальных сил квантобиля [8], [13], [15]:

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

где F_{Tx} – продольная сила тяги КД (траста), 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, $\text{с}^2/\text{м}^2$;

V_q – текущая скорость продольного движения экипажа, м/с;

c_d – коэффициент аэродинамического сопротивления, безразмерный;

ρ_w – плотность воздуха, $\text{Н} \times \text{с}^2/\text{м}^4$;

S_{fr} – лобовая площадь экипажа, м^2 ;

G_q – исходный вес (сила тяжести) квантобиля (в отсутствие лифта/антилифта), Н;

g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;

a – продольное ускорение экипажа, $\text{м}/\text{с}^2$;

δ_{wh} (deltaWh) – коэффициент инерции вращения опорных колес экипажа.

Поясняем: $G'_q = G_q - F_{Tz} - F_{wz}$; приведенная масса $m' = G_q(1 + \delta_{wh})/g$ в отсутствие трансмиссии учитывает только вращение опорных колес; $F_r = F_{k0} + F_{kv}$, где $F_{k0} = f_{k0} \cdot G'_q$, а $F_{kv} = f_{kv} \cdot V_q^2 \cdot G'_q$.

График прикладываемых к экипажу сил отображен на рис. 1. (выполненный с привлечением формы кузова Davis [22], [25], [26]). Обозначены: V_q – вектор скорости движения квантобиля; V_∞ – скорость невозмущенного набегающего потока воздуха ($|V| = |V_\infty|$); 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 КД (траста) 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_{fl} и F_{fr} – силы сопротивления качению передних и задних колес, соответственно; T_{fl} и T_{fr} – 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.

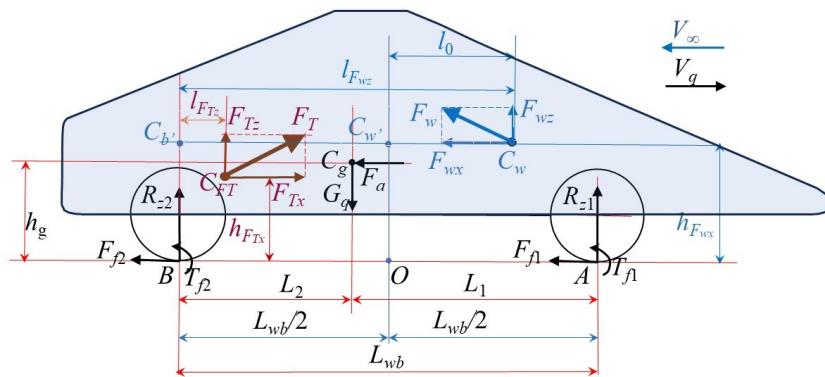


Рисунок 1 - Схема сил, действующих на квантомобиль

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.38.1>

Примечание: форма кузова – Davis; по ист. [22], [25], [26]

Баланс моментов сил, действующих на квантомобиль, детально рассмотрен в работе [13]. Здесь приведем главное.

Если начало связанный плоской системы координат разместить в точке B (назовем её СК_В – 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. 1):

$$\Sigma M_B = R_{z1} \cdot L_{ub} - G_q \cdot L_2 + (T_{f1} + T_{f2}) + F_{uux} \cdot h_{Fux} + F_{wz} \cdot l_{Fux} + F_a \cdot h_q - F_{Tx} \cdot h_{FTx} + F_{Tz} \cdot l_{FTz} = 0. \quad (3)$$

Отсюда можно найти нормальную реакцию ОП R_{z1} :

Аналогичное уравнение моментов относительно точки A позволяет найти реакцию R_{z2} . Опрокидывающий питч-момент $M_{\Sigma pm} = L_{wb}(R_{z1}-R_{z2})/2$. А требуемый стабилизирующий момент (TCM) тогда равен $M_{st} = -M_{\Sigma pm}$. Для оценки значимости аэродинамического питч-момента (АПМ) $M_{Fw} = M_{Fwx}+M_{Fwz}$ относительно ТСМ M_{st} введен коэффициент $K_{MFw,Mst} = M_{Fw}/M_{st}$.

2.4. Учет в МПДК формы представления результатов стендовых аэродинамических испытаний моделей автомобилей

Необходимо было обеспечить в МПДК, с одной стороны, возможность моделирования силового баланса и дорожного движения экипажа в принятой СК_в. А с другой стороны, – обеспечить прием коэффициентов аэродинамического воздействия c_i (c_d , c_l , c_m), опирающихся на СК_о (с началом в срединной точке О рис. 1), а также возможность имитационного моделирования стендовых испытаний в аэродинамической трубе в этой СК_о [22].

Основная форма выражения аэродинамических сил [16], [17], [18], [24]:

$$F_i = c_i \cdot (\rho_w/2) S_{fi} V_a^2 = c_i \cdot Q \quad (4)$$

где i – вид силы (d (драг) или l (лифт); c_d и c_l – соответствующие аэродинамические коэффициенты).

Для аэро-питч-момента (АПМ):

$$M_{pm} = c_m \cdot (\rho_w/2) S_{fr} V_q^2 \cdot L_{wb} = c_m \cdot Q \cdot L_{wb}. \quad (5)$$

Коэффициенты C_d , C_l , C_m , получаемые по результатам испытаний объектов в аэродинамической трубе, в данном исследовании полагаем зависимыми от скоростного режима ТС или его масштабной модели.

2.5. Привлечение результатов испытаний эталонных ПОТ к ПММ квантомобиля

В общепринятой практике аэrodинамических исследований первостепенным при разномасштабном моделировании аэrodинамических тел является соблюдение равенства чисел Рейнольдса Re , определяемых по базовому параметру – либо по длине тела Re_L , либо по высоте тела Re_H , либо по квадратному корню фронтальной площади Re_S , либо по приведенному диаметру тела Re_D . Остановимся на длине тела L . Между числом Re_L и скоростью невозмущенного набегающего потока воздуха V_∞ имеется прямолинейная зависимость:

$$Re_L = V_\infty * L/v, \quad (6)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха [16], [22], [24].

Одними из передовых работ по исследованию характера зависимостей аэродинамических коэффициентов C_d , C_l , C_m от чисел Рейнольдса для автомобилей и их ПОТ типа 1-Box, являются диссертации *Newnham P.S.* [17] и *Perry A.K.* [18].

В этих работах упомянутое требование равенства чисел Re корректируется введением критических значений числа Re (соответствующих началу и концу срыва потоков), выше которых требование равенства чисел Re смягчается – лишь бы число Re было выше посткритического значения. Построили график, являющийся упрощенным обобщением этих работ – рис. 2 (на котором оси скоростей V_{1-Box} и $V_{КамАЗ}$ определяются по уравнению (6)). Видим три характерных участка, для каждого из которых свойственно свое состояние воздушного потока, обтекающего тело. При малых числах Re (соответственно малых V_∞) $Re_L < 1,8 \cdot 10^6$ наблюдается предкритическая (*Pre-critical*) зона с ниспадающим c_d (с падением от уровня c_{dVnul} для скорости $V_q=0$). Примерно при $Re_L \sim 1,8 \cdot 10^6$ (*Critical Re*) начинается процесс срыва потока. Этот процесс *Transitional* (со значительным падением c_d) развивается до $Re \sim 2,3 \cdot 10^6$. При более высоких значениях числа Re господствует посткритическая (*Post-critical*) зона с устойчивым низким c_d .

Видим, например, что пост-критическая зона для ПОТ 1-Box (длиной 0,845 м) охватывает скорости $V > 40$ м/с, а для тела профиля 1-Box с габаритами автомобиля КамАЗ-4326 (длиной 7,3 м) зона охватывает скорости $V > 4,63$ м/с.

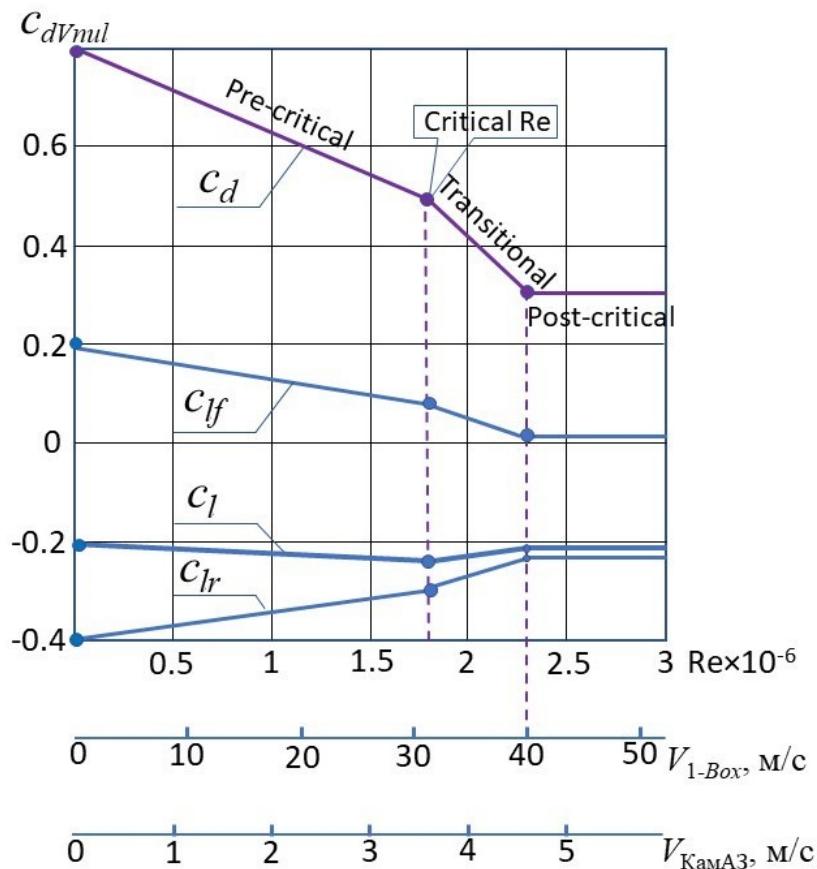


Рисунок 2 - Кусочно-линейное представление динамики изменения аэродинамических коэффициентов при изменении числа Re и скорости тела V : V_{1-Box} и $V_{КамАЗ}$ – скорости обдува ПОТ 1-Box (длиной 0,845 м) и ПОТ с пропорциями 1-Box величиной с КамАЗ-4326 (длиной 7,3 м), соответственно

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.38.2>

2.6. Simulink-модель приземного движения квантомобиля (МПДК)

Рассмотренный аналитический материал использован при формировании имитационной системы МПДК. Две базовые подсистемы МПДК: продольной динамики экипажа (*Vehicle Dynamics*), а также расчета нормальных реакций и питч-моментов (*NormReactions*) – представлены в авторских работах [14], [15].

2.7. Масштабное совмещение конкретного автомобиля-аналога и вариантов ПОТ

Для отработки и верификации модели, а затем проведения на ее основе ПИМ движения квантомобиля необходимо привлечение конструктивных и эксплуатационных характеристик существующих автомобилей. Ранее автором для обоснования силового баланса и представления динамики продольного движения квантомобиля в качестве аналога использовался автомобиль КамАЗ-4326. Накопленный материал [13] определил КамАЗ-4326 в качестве основного аналога и в данной работе. Рассмотрение аэродинамики движения потребовало привлечения данных и по некоторому множеству ПОТ [16], [22], [25], [26].

Условимся, для краткости, называть модели полноразмерных размеров ТС – макромоделями, а масштабированные модели малых размеров – микромоделями.

Хотя по каждому упомянутому во введении ПОТ множество публикаций содержит разнообразие реализованных векторов значений $\mathbf{C}_i = \{c_d, c_l, c_m\}$ (это объясняется целями, методиками и условиями проведения исследований), все же

в целом микромодели этих ПОТ можно расположить в следующий ряд с совершенствованием профиля и улучшением их аэродинамики: 1-Box [17], [18], 2-Box [17], [18], Ahmed [19], Windsor [20], Docton [21], Davis [22], [25], [26].

Для методической отработки прогнозирования устойчивости квантобиля выбрали из этого ряда два крайних варианта ПОТ с двумя противоположными (оппозитными) компонентами вектора \mathbf{C}_i : $\{c_d = 0,38; c_l = -0,22; c_m = 0,11\}$ [17] для 1-Box и $\{c_d = 0,263; c_l = 0,42; c_m = -0,35\}$ [22] для Davis. (см. рис. 3)

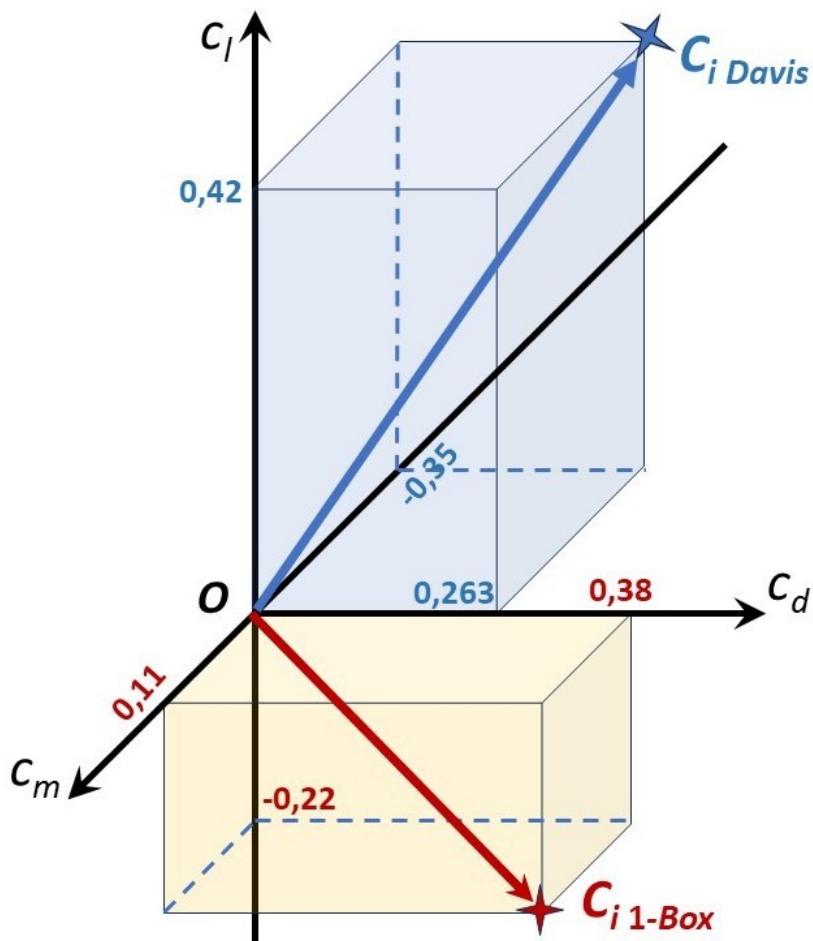


Рисунок 3 - Представление оппозитных вариантов ПОТ: 1-Box и Davis
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.38.3>

Как видим, при переходе от ПОТ 1-Box к ПОТ Davis коэффициент драга c_d значительно уменьшается, антилифт (прижим к ОП) сменяется на существенный лифт, а АПМ меняет задирающий характер на клюющий. Выбор таких крайних оппозитных вариантов должен обеспечить, по замыслу, рельефность сравнительного анализа и, в какой-то мере, – обозначить границы поля возможных промежуточных вариантов реализуемой продольной устойчивости (на основании 2-й теоремы Больцано-Коши о промежуточном значении непрерывной функции [28]).

Рассмотрим привлечение материалов по аэродинамике ПОТ 1-Box к построению аэродинамического паспорта квантобиля-аналога КамАЗ-4326.

Полнонатурный КамАЗ-4326 имеет габаритные размеры L:W:H (м): 7,3:2,55:3,3 (соотношение 1:0,35:0,45). Представленная в литературе модель 1-Box [18] имеет размеры 0,845:0,39:0,38 м (соотношение 1:0,46:0,45). Как видим, пропорции отличаются (по ширине), что отражено на рис. 4a, где параметром масштабирования выбрана длина объекта.



Рисунок 4 - Совмещение геометрических моделей 1-Box и КамАЗ-4326:
a - масштабирование по длине экипажа; b - масштабирование по ширине экипажа
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.38.4>

Выбор в качестве параметра масштабирования ширины объекта приводит к наложению, представленному на рис. 4b. Этот вариант удобнее, если переносить результаты обдува модели 1-Box при отсутствии клиренса (что применяют иногда для 1-Box).

Всё же, оценив экспертино, для методической проработки оставили вариант *a*, с учетом в расчетах разницы фронтальных площадей объектов. Для этого варианта коэффициент масштабирования линейных размеров $K_L = 7,3 / 0,845 = 8,639$. Для площадей – $K_S = K_L^2 = 74,63$. Для объемных, массовых и силовых величин – $K_M = K_L^3 = 644,75$.

Для имитации посредством представленной выше S-модели проведена подготовка шести вариантов расчетных объектов, помещенных в табл. 1. Это – полнотатурный КамАЗ-4326 и его микромодель в масштабе 1: 8,639; 1-Box тело исходного размера [18], а также его макромодель в масштабе $K_L = 8,639$; *Davis* тело исходного размера [22], а также его макромодель в масштабе $K_L = 5,659$. Макромодели 1-Box и *Davis* сформированы с доведением до длины 7,3 м.

В табл.1 жирным шрифтом занесены первоначальные, исходные величины, а простым шрифтом – полученные расчетом с прямым или обратным использованием коэффициентов подобия K_L , K_S и K_M . Отметим, что использование коэффициента K_M для силовых воздействий при масштабном преобразовании объясняется прямой связью между силой и массой, на которую сила действует.

Таблица 1 - Данные по разномасштабным аэродинамическим моделям КамАЗ-4326, 1-Box и *Davis*

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.38.5>

Параметр	Условный номер модели					
	1	2	3	4	5	6
КамАЗ исходная макромодель	Мод. КамАЗ 1/ $K_L = 1/8,639$ микромодель	Мод. 1-Box 1/ $K_L = 8,6397$ макромодель	1-Box исходная микромодель	<i>Davis</i> 1/ $K_L = 5,659$ макромодель	<i>Davis</i> исходная микромодель	
L , м	7,3	0,845	7,3	0,845	7,3	1,29
W , м	2,55	0,295	3,37	0,39	2,55	0,45
H , м	3,3	0,382	3,28	0,38	1,87	0,33
S_{fr} , м ²	8,415	0,1127	11,05	0,1482	4,76	0,1485
L_{wb} , м	4,25	0,492	4,25	0,492	4,87	0,860
L_2 , м	2,125	0,246	2,125	0,246	2,435	0,430
H_g , м	1,3	0,1505	1,3	0,1505	0,9	0,159
H_{Ftx} , м	1,0	0,1158	1,0	0,1158	0,8	0,141
H_w , м	1,6	0,190	1,6	0,190	1,0	0,177
L_{Ftx} , м	0,5	0,05787	0,5	0,05787	0,5	0,088
r_d , м	0,5	0,05787	0,5	0,05787	0,5	0,088
m , кг	8970	13,912	8970	13,912	8970	49,5
G_q , Н	88000	136,49	88000	136,49	88000	485,65
F_T , Н	90000	139,59	90000	139,59	90000	496,7
K_L	8,6397	1	8,6397	1	5,659	1
K_S	74,63	1	74,63	1	32,02	1
K_M	644,75	1	644,75	1	181,2	1
$SqrS_{fr}$	2,901	0,336	3,324	0,385	2,182	0,385
K_{Sfr}	0,397	0,397	0,455	0,455	0,299	0,299
V_∞ , м/с	5	40	5	40	5	40
c_d	0,38	0,38	0,38	0,38	0,263	0,263
c_l	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	0,42	0,42
c_m	0,11	0,11	0,11	0,11	-0,35	-0,35

В табл. 1 в строку H_{Ftx} занесены гипотетические исходные значения высоты действия вектора тягового усилия. В процессе ПИМ они могут меняться по потребности, вплоть до $H_{Ftx} = 0$, когда надо представить классический автомобиль с реализацией тяги в пятнах контакта ведущих колес автомобиля с ОП.

Основные результаты

3.1. Подготовка и план расчетов

Опорными значениями параметров приняты помещенные в табл. 1. Обоснование базовых данных по макромодели КамАЗ-4326 (колонка 1) можно найти в авторских работах [8], [9], [13]. Массу модели КамАЗ-4326 $m = 8970$ кг

использовали и для других макромоделей. Для всех вариантов моделей приняли базовые значения $f_{kv} = 0,00037 \text{ c}^2/\text{м}^2$; $\rho_w = 1,225 \text{ Н c}^2/\text{м}^4$; $\delta_{wh} = 0,04$; $\beta = 0^\circ$. Максимальное значение траста $F_T = 90000 \text{ Н}$ выбрано из условия, что при угле $\beta = 77,9^\circ$ оно (в соответствии с (1)) обеспечивает полное вывешивание экипажа весом 88000 Н, оставляя $F_{Tx} = 18865 \text{ Н}$ на обеспечение горизонтального движения (см. подробнее в [13]).

Размерности величин на всех результирующих графиках следующие: $[Ftx, Ftz, Fa, Fr, Fwx, Fwz, Rz1st] = \text{Н}$; $[Mftx, Mftz, Mfa, Mfr, Mfwx, Mfwz, Mst] = \text{Нм}$; $[KMFw.Mst] = 0$; $[\text{Acceleration}] = \text{м/с}^2$; $[\text{Velocity}] = \text{м/с}$; $[\text{Distance}] = \text{м}$.

3.2. Расчеты на микромоделях

Сначала рассчитали для микромодели автомобиля 1-Box ТСМ M_{st} (обратный аэро-питч-моменту) путем реконструкции стендовых испытаний в автомобильном варианте ($H_{FTx}=0 \text{ м}$), задав $f_{k0}=0$ и скорость обдува $V_\infty = 40 \text{ м/с}$. Результаты на рис. 5а. Затем спрогнозировали ТСМ для микромодели квантомобиля 1-Box ($H_{FTx} = 0,1158 \text{ м}$) для тех же остальных условий (рис. 5б).

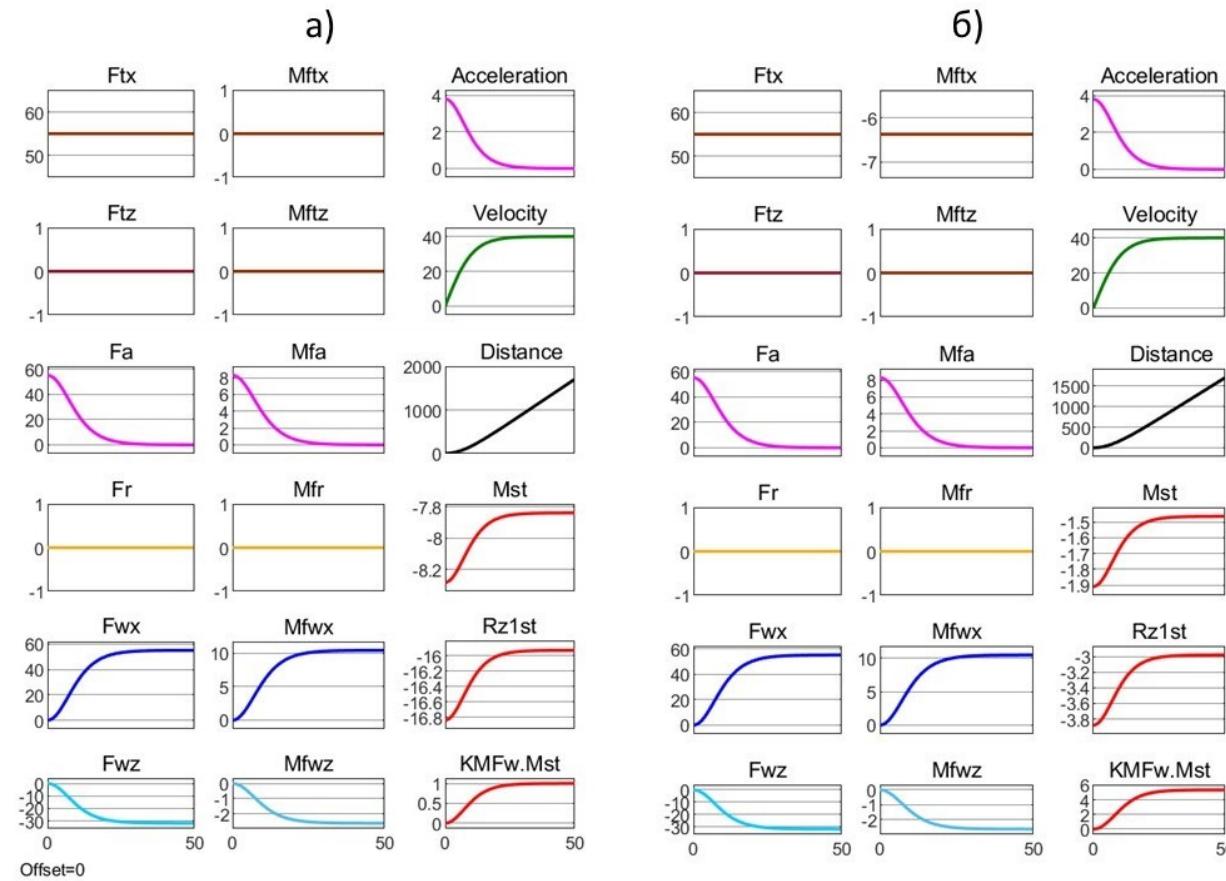


Рисунок 5 - Графики изменения основных показателей при виртуальном разгоне микромодели 1-Box (с данными по табл. 1) до скорости $V_{ust} = 40$ м/с при $f_{k0} = 0$ и соответствующем постоянном значении вектора траста $F_{tx} = 55$ Нм в двух вариантах:

а - автомобильный ($H_{Ftx} = 0$ м); б - квантомобильный ($H_{Ftx} = 0,1158$ м)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.38.6>

Аналогичные расчеты произвели для микромодели модели КамАЗ-4326. Здесь для достижения $V_{ust} = 40$ м/с понадобился $F_{Tx} = 42$ Нм. Графики не приводим, отмечая лишь разницу показателей в сравнении с моделью 1-Box в 5 – 10%.

Аналогичные расчеты произвели и для микромодели *Davis*: а) автомобильный вариант; б) квантомобильный вариант. Здесь для достижения $V_{ust} = 40$ м/с понадобился $F_{Tx} = 38,3$ Нм (см. рис. 6).

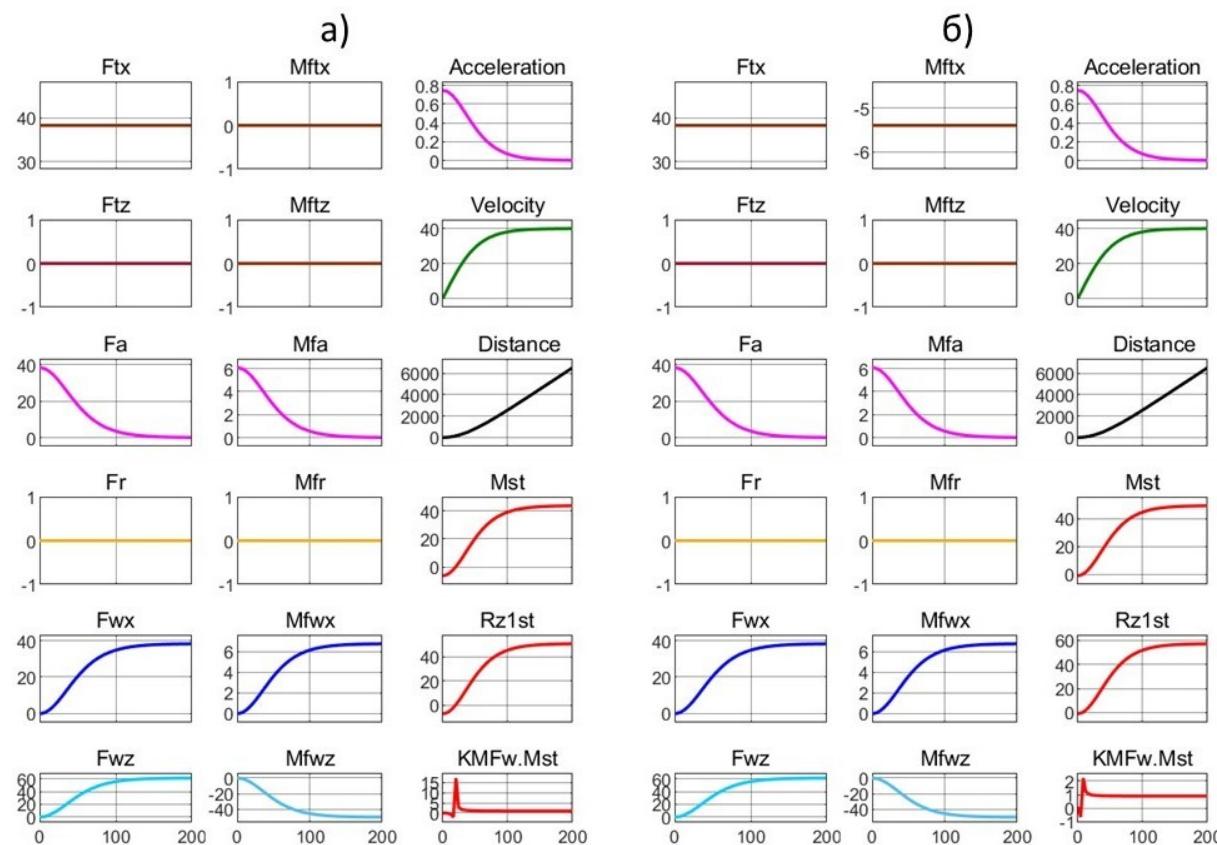


Рисунок 6 - Графики изменения основных показателей при виртуальном разгоне микромодели Davis (с данными по табл. 1) до скорости $V_{ust} = 40$ м/с при $f_{k0} = 0$ и соответствующем постоянном значении вектора траста $F_{tx} = 38,3$ Нм в двух вариантах:

a - автомобильный ($H_{FTx} = 0$ м); *б* - квантомобильный ($H_{FTx} = 0,141$ м)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.38.7>

Оценив небольшую разницу в показателях для моделей 1-Box и КамАЗ, оставляем в качестве модели, конкурентной модели *Davis*, модель 1-Box.

Для сравнительного анализа топологии зависимостей ТСМ M_{st} от коэффициента сопротивления f_{k0} для скорости установившегося движения $V_{ust} = 40$ м/с провели расчеты для микромоделей 1-Box и *Davis* – рис.7.

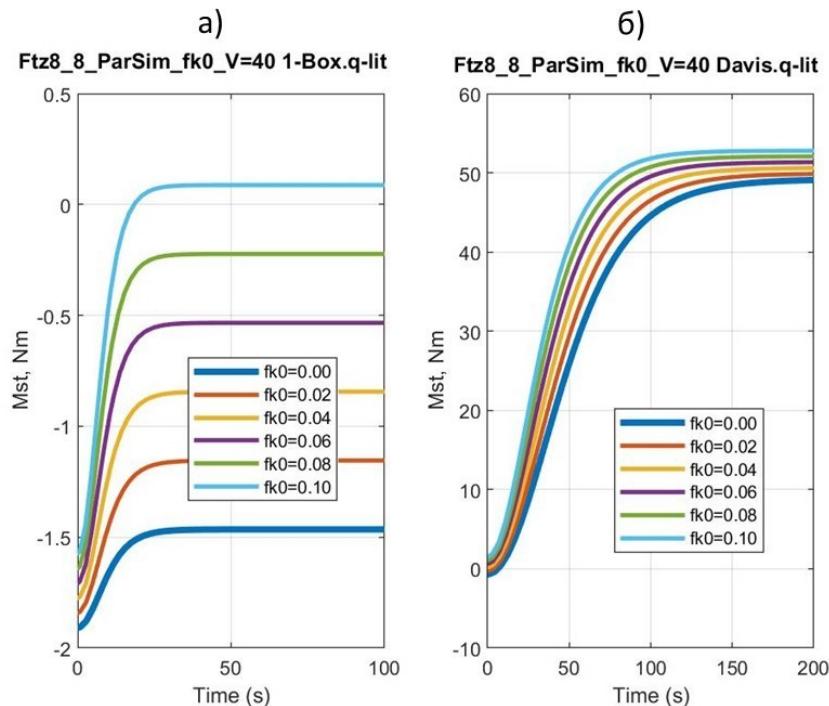
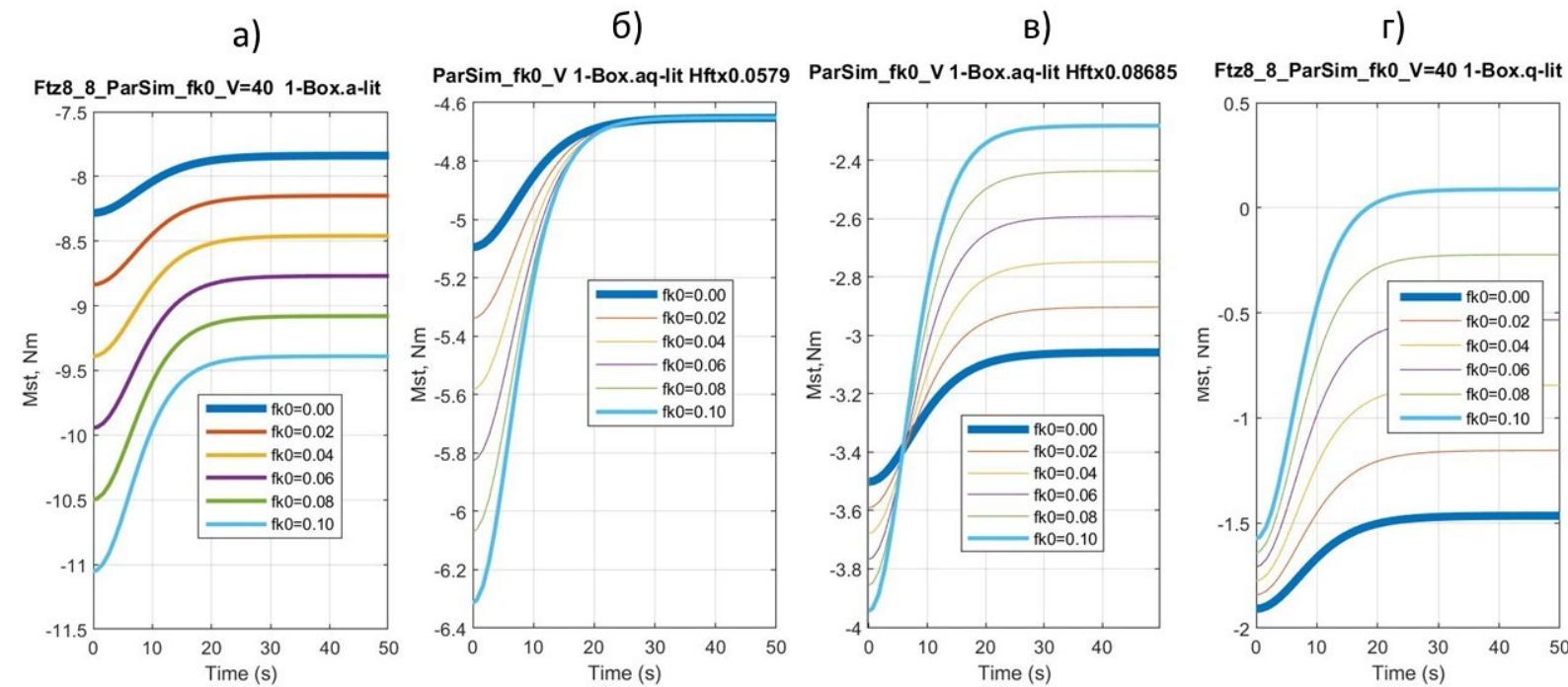


Рисунок 7 - Графики изменения ТСМ M_{st} при разгоне микромоделей 1-Box (a) и *Davis* (б) до соответствующего V_{ust} при различных f_{k0}

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.38.8>

Для исследования возможной трансформации топологии семейства кривых ТСМ при смене высоты действия траста H_{fix} произвели расчеты для нескольких высот H_{fix} микромодели 1-Box (0 м – автомобильный вариант; 0,0579 м; 0,08685 м и 0,1158 м – квантомобильный вариант) – рис. 8.



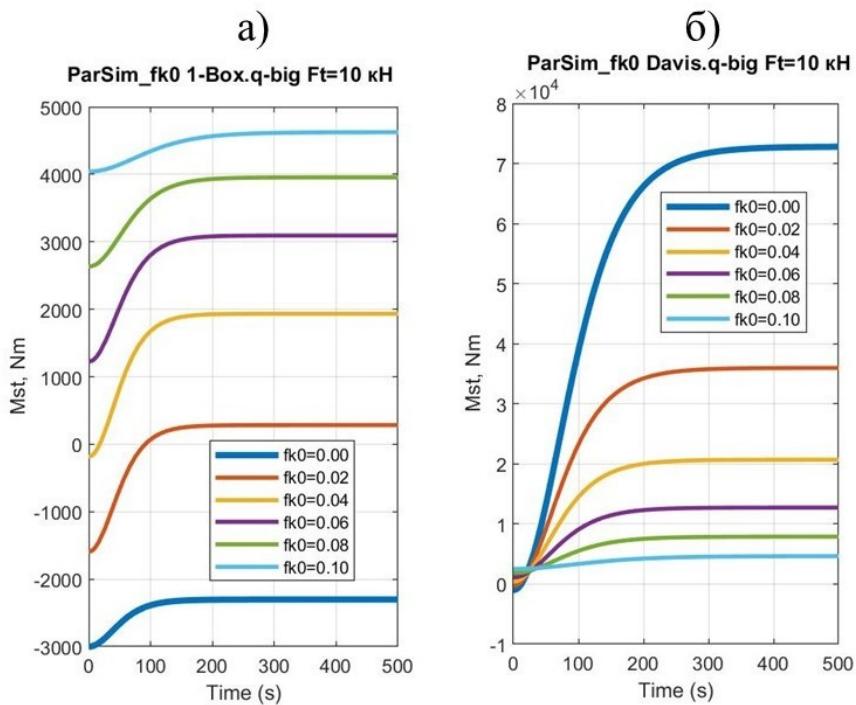
386-387

Рисунок 8 - Графики зависимости ТСМ при разгоне микромодели 1-Box до заданной скорости $V_{ust} = 40$ м/с при различных значениях f_{k0} и сменой высоты действия траста от H_{FTx} = 0 м (автомобильный вариант – рис. 8а) до $H_{FTx} = 0,1158$ м (квантомобильный вариант № 4 по табл. 1 – рис. 8г)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.38.9>

3.3. Расчеты на макромоделях

Сравнительный расчет зависимости ТСМ от значений f_{k0} при разгоне макромоделей 1-Box и Davis при постоянной величине траста $F_{Tx} = 10$ кН – на рис. 9.



№№300q

Рисунок 9 - Графики зависимости ТСМ от значений f_{k0} при разгоне макромоделей 1-Box и Davis при постоянной величине траста $F_{Tx} = 10$ кН

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.38.10>

Сравнительный расчет зависимости ТСМ от значений f_{k0} при разгоне макромоделей 1-Box и Davis при постоянной величине траста $F_{Tx} = 50$ кН – на рис. 10.

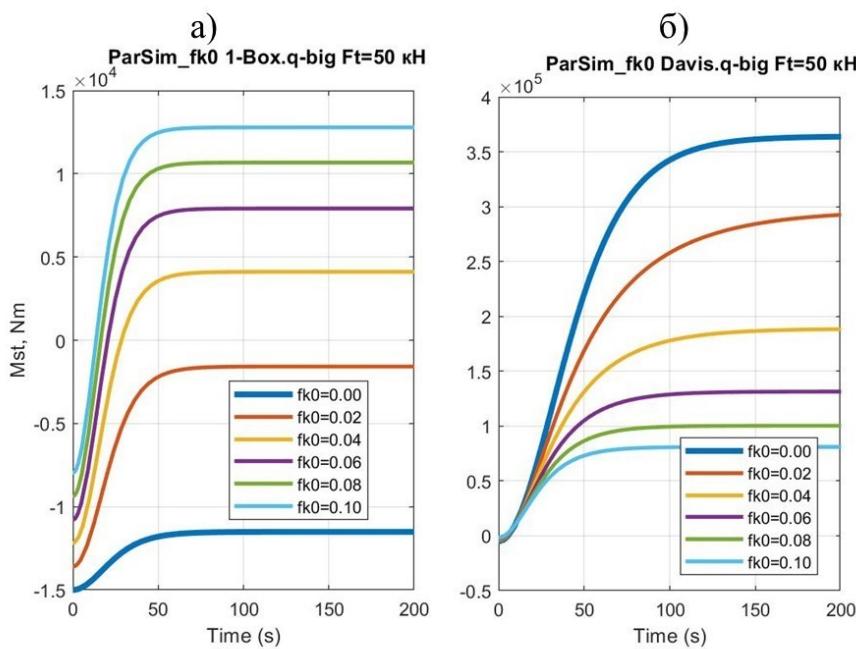


Рисунок 10 - Графики зависимости ТСМ от значений f_{k0} при разгоне макромоделей 1-Box и Davis при постоянной величине траста $F_{Tx} = 50$ кН

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.38.11>

Сравнительный расчет зависимости ТСМ от значений f_{k0} при разгоне макромоделей 1-Box и Davis при постоянной величине траста $F_{Tx} = 90$ кН – на рис. 11.

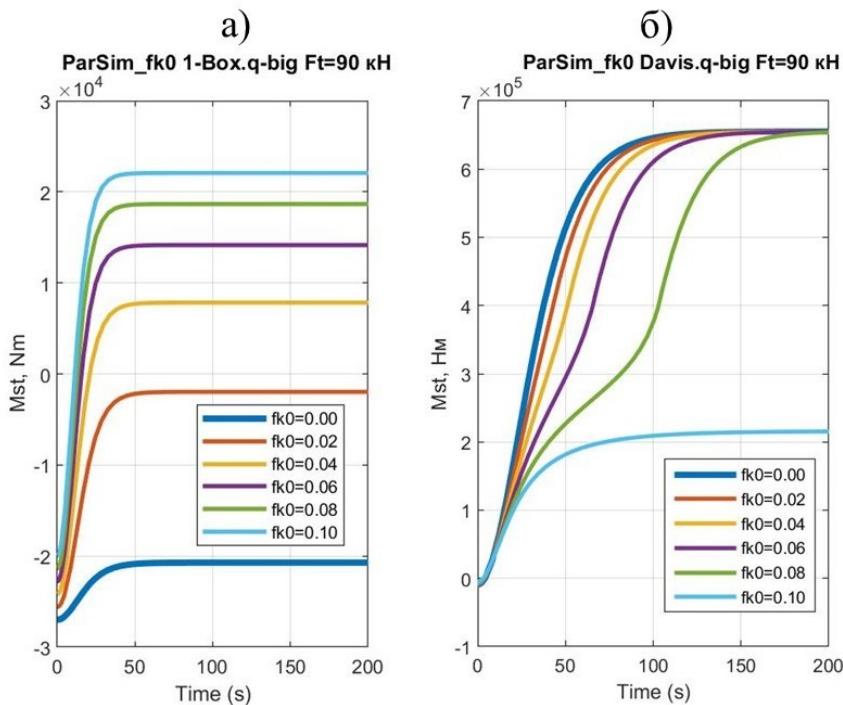


Рисунок 11 - Графики зависимости ТСМ от значений f_{k0} при разгоне макромоделей 1-Box и Davis при постоянной величине траста $F_{Tx} = 90$ кН

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.38.12>

Графики изменения M_{st} в процессе разгона макромоделей квантомобилей 1-Box и Davis с выходом на заданные скорости установившегося движения V_{ust} (10; 20; 30; 40 м/с;) при дорожном сопротивлении $f_{k0} = 0.1$ помещены на рис. 12.

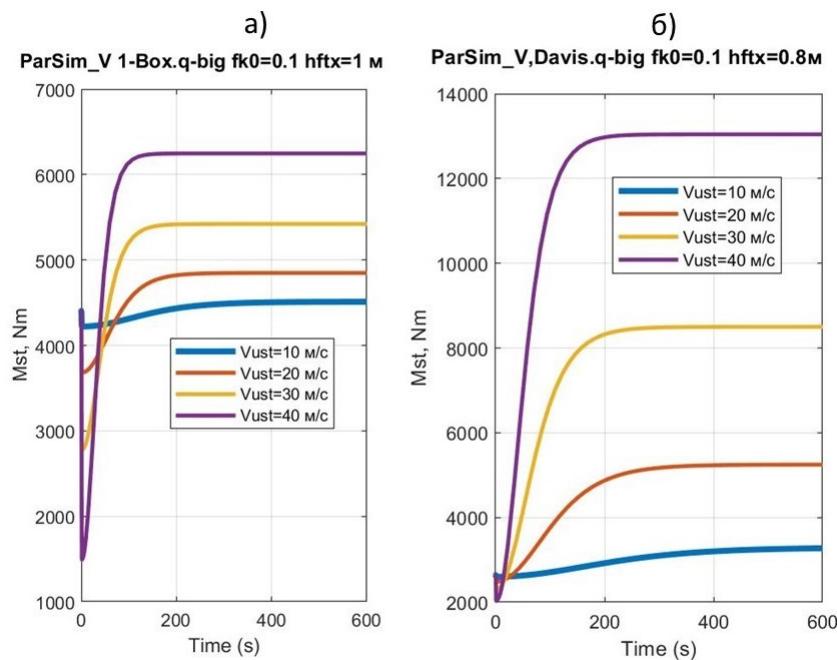


Рисунок 12 - Графики изменения M_{st} в процессе разгона макромоделей 1-Box и Davis с выходом на заданные скорости установившегося движения V_{ust} при $f_{k0} = 0.1$
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.38.13>

Графики изменения M_{st} в процессе разгона макромоделей 1-Box и Davis для ряда f_{k0} (0; 0,05; 0,10) с выходом на заданные скорости V_{ust} (10; 25; 40 м/с) – помещены на рис. 13.

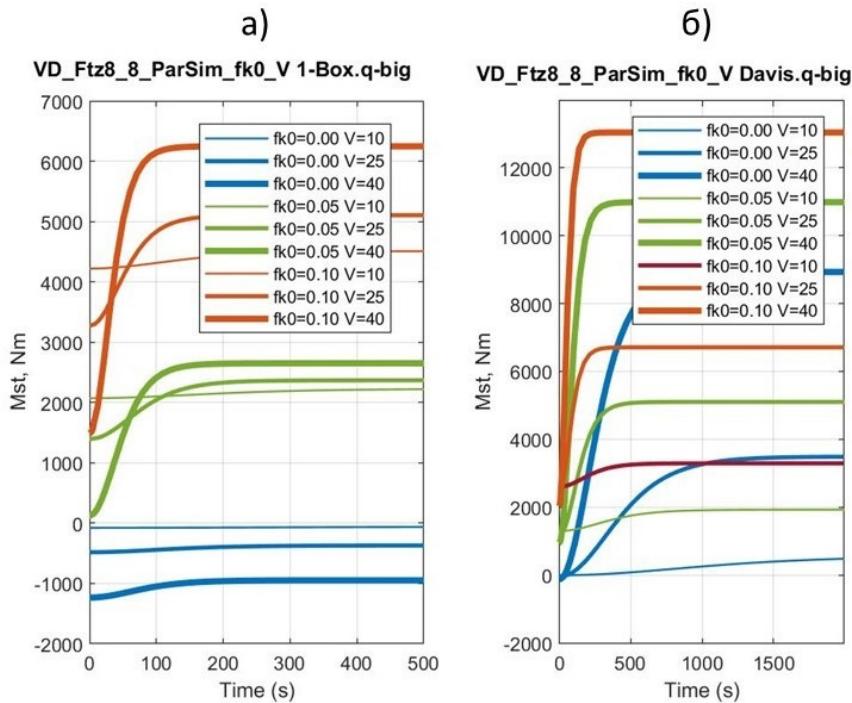


Рисунок 13 - Графики изменения M_{st} в процессе разгона макромоделей 1-Box и Davis для ряда f_{k0} (0; 0,05; 0,10) с выходом на заданные скорости V_{ust} (10; 25; 40 м/с).
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.38.14>

Обсуждение

В предыдущих работах автора [8], [10], [11], [12], [13] закладывались основы Simulink-моделирования движения квантомобиля, настраивались объекты-прототипы из числа существующих наземных ТС, в том числе и задействованный здесь КамАЗ-4326. Это позволило развить S-модель до уровня МПДК (частично представленного в работе [15]) и провести с ее помощью расчетное исследование продольной устойчивости квантомобиля при аэродинамических конфигурациях кузова, представляемых эталонными ПОТ.

Из методических построений отметим кусочно-линейный примитив представления динамики изменения аэродинамических коэффициентов при изменении числа Re и скорости тела V (рис. 2). Естественно, аэродинамические процессы в докритической зоне характеризуются большим (и трудно оцениваемым) разбросом значений c_d , c_l , c_m . Но при малых скоростях движения ТС доля АПМ в суммарном питч-моменте мала, так что ее погрешностью можно пренебречь – ради непрерывности расчета в зоне малых скоростей.

В посткритической зоне постоянство значений названных коэффициентов за скоростными пределами, обусловленными проведенными натурными аэродинамическими испытаниями, – тоже проблематично. Сознавая это, а также учитывая большой вклад АПМ в баланс моментов на высоких скоростях (соответственно, и большой вклад АПМ в погрешность расчета показателей движения), автор все же (без привлечения критерии Маха и Строхаля) осуществлял расчеты для этих скоростей в целях методической отработки развиваемых концепций и ПИМ.

Основные расчеты, однако, проведены с микромоделями для скоростей 40 м/с, а для макромоделей – более 10 м/с (см. рис. 2).

Относительно данных табл. 1. Перенос значения вектора C_i ($c_d = 0.38$; $c_l = -0.22$; $c_m = 0.11$) из данных по модели 1-Box на модели КамАЗ-4326 нужно признать весьма условным при масштабной трансформации по варианту рис. 4а.

Обсуждение результатов расчетов начнем с рассмотрения графиков на рис. 5, отображающих реконструкцию в МПДК стендового эксперимента Ньюнхема [17] с микромоделью 1-Box. Напомним, что МПДК рассчитывает разгон масштабной модели с определенными геометрическими, массовыми и весовыми характеристиками (см.табл. 1) с выходом на скорость установившегося движения V_{ust} – так бы складывались графики изменения представленных параметров движения модели по ОП. Но поскольку масштабная модель прикреплена к стенду, изменение скорости (*Velocity*), ускорение (*Acceleration*) и дистанцию (*Distance*) следует «читать» как изменение скорости и ускорение набегающего потока воздуха V_∞ , а также путь, реализуемый воздушным потоком относительно покоящейся модели. Сила инерции массы модели (*Fa*) носит в данном случае условный характер (хотя при необходимости ее носителем можно определить эквивалентную массу воздуха и искать во внешнем контуре стендса). ТСМ M_{st} в условиях крепления модели к столу стендса – есть силовой питч-момент, выдерживаемый конструкцией стендса. Сила R_{z1st} при этом – нормальная реакция передней опоры модели.

Сравнивая на рис. 5 автомобильный (а) и квантомобильный (б) варианты модели 1-Box, видим, что появившийся у квантомобиля момент $M_{fix} = -6,374$ Нм как раз равен разнице M_{st} левого (а) и правого (б) вариантов ТС ($-7.839 - -1.465 = -6,374$).

Аналогичные построения и расчеты для микромодели КамАЗ позволили получить мало отличающиеся (качественно) результаты: $M_{fix} = -5,978 - -1,118 = -4,86$ Нм (на отдельный рис. не вынесено).

Сравнивая на рис. 6 автомобильный (а) и квантомобильный (б) варианты модели *Davis*, видим, что появившийся у квантомобиля момент $M_{fix} = -5,4$ Нм как раз равен разнице M_{st} левого (а) и правого (б) вариантов ТС ($43,6 - 49,0 = -5,5$). Но разительным явилось отличие величины M_{st} микромодели квантомобиля *Davis* от таковой для 1-Box и КамАЗ (49 Нм против $-1 - -1,5$ Нм) – то есть для *Davis* характерна необходимость в большом стабилизирующем моменте, нейтрализующем клюющий питч-момент.

В силу незначительной разницы показателей 1-Box и КамАЗ (на фоне *Davis*) и было признано целесообразным в дальнейшем противопоставлять модели *Davis* только одну из оставшихся моделей: 1-Box.

Анализируя графики на рис. 7, можно отметить, что микромодель квантомобиля 1-Box при значениях $f_{k0} = 0 \div 0,08$ требует нейтрализации положительного (задирающего) питч-момента. Микромодель же *Davis* при всех значениях $f_{k0} = 0 \div 0,10$ требует нейтрализации отрицательного (клюющего) питч-момента.

Серий расчтетов обнаружено, что смена высоты действия траста может приводить не только к смещению семейства кривых зависимости M_{st} от дорожного сопротивления f_{k0} , но и способна изменить топологию соответствующей поверхности отклика. Это можно видеть на примере рис. 8. Видим, что при $H_{fix}=0,0579$ м (экспозиция б) ТСМ $M_{st} \approx -4,65$ Нм для всех $f_{k0} = 0 \div 0,1$. А далее (при $H_{fix} > 0,0579$ м – экспозиции в и г) семейство кривых даже «опрокидывается».

Расчеты на макромоделях в целом позволили отметить подобие топологии семейств кривых (поверхностей) для микро- и макромоделей. В подтверждение можно сравнить графики для моделей 1-Box на рис. 8г и рис. 9а (за исключением зоны малых скоростей).

Итоги обсуждения ПИМ макромоделей 1-Box и *Davis* (по рис. 9 ÷ 13) приведем в виде табл. 2.

Таблица 2 - Сравнение диапазонов и разбросов ТСМ макромоделей 1-Box и Davis в различных ситуациях

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.38.15>

№ рисунка	1-Box		Davis	
	Диапазон ТСМ, Нм	Разброс ТСМ, Нм	Диапазон ТСМ, Нм	Разброс ТСМ, Нм
9	$-2200 \div 4600$	6800	$72000 \div 2000$	-7000
10	$-12000 \div 13000$	25000	$360000 \div 80000$	-280000
11	$-21000 \div 22000$	3000	$660000 \div 220000$	-440000
12	$4500 \div 6200$	1700	$3300 \div 13000$	9700
13	$0 \div 6000$	6000	$200 \div 1300$	12800

Обобщая анализ графиков, отметим следующее. Диапазоны и разброс значений ТСМ у макромодели *Davis* гораздо шире, чем у 1-Box. При этом, если ТСМ у 1-Box в зависимости от сочетания дорожного сопротивления и скоростей движения может быть как отрицательным, так и положительным, то у *Davis* ТСМ всегда положительны (т.е. направлены на нейтрализацию клюющего пич-момента).

Выбранные для расчетов модели ПОТ с крайними, оппозитными значениями вектора C_i позволили выявить существенную разницу пич-моментов, возникающих при различных сочетаниях скоростей движения ТС и дорожного сопротивления и отличающихся как по величине, так и по направлению. Промежуточные значения вектора C_i , очевидно (в силу компактности и непрерывности пространства размещения этого вектора), будут приводить к промежуточным ситуациям и результатам ПИМ [28].

Заключение

Авторская Simulink-модель приземного движения квантомобиля (МПДК), настроенная на решение задач исследования с привлечением материалов испытаний эталонных аэродинамических моделей автомобилей, позволила провести расчетное исследование динамики и устойчивости продольного движения квантомобиля.

В целом, подтвердилась гипотеза: уровень и характер пич-момента квантомобиля отличается от такового для автомобиля. Он может быть значительным, иногда меняя направленность (относительно автомобильного варианта ТС) и требует его оперативной нейтрализации (минимизации).

Основными средствами минимизации пич-момента могут быть следующие: жесткие конструктивные (обводы и оперение корпуса); выдвижное оперение; дополнительные стабилизирующие трастеры; специальные приемы вождения.

На основе результатов ПИМ показана значимость проблемы обеспечения продольной устойчивости квантомобиля. Основными факторами, усугубляющими названную проблему, в сравнении с классическим автомобилем, являются возникновение и реализация тяговой силы над опорной поверхностью, что увеличивает опасность опрокидывания.

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 воздействия в процессе движения.

МПДК можно рассматривать как важную компоненту структуры дальнейших исследований квантомобиля.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Нестеренко Г.А., Омский государственный технический университет, Омск Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.38.16>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Nesterenko G.A., Omsk State Technical University, Omsk Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.38.16>

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: 20.12.2023).
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: 20.12.2023).
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. — 2021. — <https://www.researchgate.net/publication/350108418> (accessed: 20.12.2023).
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: 20.12.2023).

6. Пат. 2185526 Российская Федерация, МПК F 03 Н 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?ysclid=ljolp35y5g195867225 (дата обращения: 20.12.2023).
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. — 2019. — № 1. — 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. — 2018. — № 4 (69). — С. 164-174. — DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-4-189-198.
9. Kotikov Yu.G. Specifics of the Quantomobile Force Balance / Yu.G. Kotikov // Architecture and Engineering. — Vol. 4. — Iss. 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. — 2020. — № 6 (83). — С. 195-205. — DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-6-195-205.
12. Kotikov Yu.G. The Rise of the Quantomobile Theory / Yu.G. 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: 20.12.2023). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.136.24.
16. Le Good G.M. On the Use of Reference Models in Automotive Aerodynamics / G.M. Le Good, K.P. Garry // 2004 SAE World Congress Detroit. — 2004.
17. Newnham P.S. The Influence of Turbulence on the Aerodynamic Optimization of Bluff Body Road Vehicles / P.S. Newnham. — Loughborough University, 2014. — 187 p. — URL: <https://hdl.handle.net/2134/14381> (accessed: 20.12.2023).
18. Perry A.K. An Investigation into the Base Pressure of Simplified Automotive Squareback Geometries / A.K. Perry. — Loughborough University, 2016. — 221 p. — URL: <https://hdl.handle.net/2134/22605> (accessed: 20.12.2023).
19. Ahmed S. Some Salient Features of the Time — Averaged Ground Vehicle Wake / S. Ahmed, G. Ramm, G. Faltin // SAE Transactions. — 1984. — Vol. 93(2). — P. 473-503. — URL: <https://www.jstor.org/stable/44434262> (accessed: 20.12.2023).
20. Windsor S. The Influence of Aerodynamic Lift on High Speed Stability of Passenger Cars / S. Windsor, G.M. Le Good. — 1993. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/286001938> (accessed: 20.12.2023).
21. Le Good G. An Investigation of Aerodynamic Effects of Body Morphing for Passenger Cars in Close-Proximity / G. Le Good, M. Resnick, P. Boardman [et al.] // Fluids. — 2021. — № 6. — P. 64. — DOI: 10.3390/fluids6020064.
22. Johl G. The Design and Performance of a 1.9m X 1.3m Indraft Wind Tunnel / G. Johl. — Loughborough University, 2010. — 124 p. — URL: <https://hdl.handle.net/2134/7194> (accessed: 20.12.2023).
23. Piechna J. A Review of Active Aerodynamic Systems for Road Vehicles / J. Piechna // Energies. — 2021. — № 14(23). — DOI: 10.3390/en14237887.
24. Hucho W. Aerodynamics of Road Vehicles / W. Hucho // Annu. Rev. Fluid Mech. — 1993. — № 25. — P. 485-537.
25. Davis J.P. Wind Tunnel Investigation of Road Vehicle Wakes / J.P. Davis. — University of London, 1982. — 244 p. — URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Wind-tunnel-investigation-of-road-vehicle-wakes-Davis/118d2d12a4dfe50ec18a5b7290373f147c0698ef> (accessed: 20.12.2023).
26. Passmore M.A. The Measurement of Transient Aerodynamics Using an Oscillating Model Facility / M.A. Passmore, S. Mansor. — 2006.
27. 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.
28. Математический анализ – лекции. — URL: <http://allmath.ru/highermath/mathanalis/matan/matan2.htm> (дата обращения: 20.12.2023).

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: 20.12.2023).
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: 20.12.2023).
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. — 2021. — <https://www.researchgate.net/publication/350108418> (accessed: 20.12.2023).

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: 20.12.2023).
6. Pat. 2185526 Russian Federation, Int. Cl. F 03 H 5/00. Sposob sozdaniya tyagi v vakuum 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=ljolp35y5g195867225 (accessed: 20.12.2023). [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 Yu.G. Kvantomobil': issledovanie formirovaniya i prilozheniya tyagovoy sily [Quantomobile: Research of Formation and Imposition of Thrust] / Yu.G. Kotikov // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. — 2018. — № 4 (69). — P. 189-198. — DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-4-189-198. [in Russian]
9. Kotikov Yu.G. Specifics of the Quantomobile Force Balance / Yu.G. Kotikov // Architecture and Engineering. — Vol. 4. — Iss. 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 Yu.G. Ispol'zovanie svojstv transportnyh sredstv v koncepte vsesrednogo mul'timodal'nogo kvantomobilja [Using the Properties of Vehicles in the Concept of the Multi-environment Multi-modal Quantomobile] / Yu.G. Kotikov // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. — 2020. — № 6 (83). — P. 195-205. — DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-6-195-205. [in Russian]
12. Kotikov Yu.G. The Rise of the Quantomobile Theory / Yu.G. Kotikov // Architecture and Engineering. — 2020. — Vol. 5. — Iss. 4. — P. 74-81.
13. Kotikov Ju.G. Osnovy teorii kvantomobilja [Fundamentals of the Quantomobile Theory] / Ju.G. Kotikov. — SPb: SPbGASU, 2021. — 210 p. — DOI: 10.23968/978-5-9227-1142-5-2021-1-253. [in Russian]
14. Kotikov Yu.G. Raschetnoe issledovanie prodl'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 Ju.G. Ocenna prodl'noj ustojchivosti kvantomobilja na baze pokazatelej ajerodinamiki avtomobilja-analoga [An Evaluation of Longitudinal Stability of the Quantum Car Based on Aerodynamic Parameters of the Analogue One] / Ju.G. Kotikov // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij 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. Le Good G.M. On the Use of Reference Models in Automotive Aerodynamics / G.M. Le Good, K.P. Garry // 2004 SAE World Congress Detroit. — 2004.
17. Newnham P.S. The Influence of Turbulence on the Aerodynamic Optimization of Bluff Body Road Vehicles / P.S. Newnham. — Loughborough University, 2014. — 187 p. — URL: <https://hdl.handle.net/2134/14381> (accessed: 20.12.2023).
18. Perry A.K. An Investigation into the Base Pressure of Simplified Automotive Squareback Geometries / A.K. Perry. — Loughborough University, 2016. — 221 p. — URL: <https://hdl.handle.net/2134/22605> (accessed: 20.12.2023).
19. Ahmed S. Some Salient Features of the Time — Averaged Ground Vehicle Wake / S. Ahmed, G. Ramm, G. Faltin // SAE Transactions. — 1984. — Vol. 93(2). — P. 473-503. — URL: <https://www.jstor.org/stable/44434262> (accessed: 20.12.2023).
20. Windsor S. The Influence of Aerodynamic Lift on High Speed Stability of Passenger Cars / S. Windsor, G.M. Le Good. — 1993. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/286001938> (accessed: 20.12.2023).
21. Le Good G. An Investigation of Aerodynamic Effects of Body Morphing for Passenger Cars in Close-Proximity / G. Le Good, M. Resnick, P. Boardman [et al.] // Fluids. — 2021. — № 6. — P. 64. — DOI: 10.3390/fluids6020064.
22. Johl G. The Design and Performance of a 1.9m X 1.3m Indraft Wind Tunnel / G. Johl. — Loughborough University, 2010. — 124 p. — URL: <https://hdl.handle.net/2134/7194> (accessed: 20.12.2023).
23. Piechna J. A Review of Active Aerodynamic Systems for Road Vehicles / J. Piechna // Energies. — 2021. — № 14(23). — DOI: 10.3390/en14237887.
24. Hucho W. Aerodynamics of Road Vehicles / W. Hucho // Annu. Rev. Fluid Mech. — 1993. — № 25. — P. 485-537.
25. Davis J.P. Wind Tunnel Investigation of Road Vehicle Wakes / J.P. Davis. — University of London, 1982. — 244 p. — URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Wind-tunnel-investigation-of-road-vehicle-wakes-Davis/118d2d12a4dfe50ec18a5b7290373f147c0698ef> (accessed: 20.12.2023).
26. Passmore M.A. The Measurement of Transient Aerodynamics Using an Oscillating Model Facility / M.A. Passmore, S. Mansor. — 2006.
27. Karabcev V.S. Ajerodinamika plohoobtekaemyh tel i vozmozhnosti ee primenenija pri proektirovaniyu gruzovyh avtomobilej [Aerodynamics of Bluff Bodies and the Possibility of Its Application in the Design of Trucks. Analytical Review] / V.S. Karabcev, D.H. Valeev // Mehanika mashin, mehanizmov i materialov [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials]. — 2011. — № 4 (17). — P. 97-102. [in Russian]

28. Matematicheskij analiz – lekcii [Mathematical analysis – Lectures]. — URL:
<http://allmath.ru/highermath/mathanalis/matan2.htm> (accessed: 20.12.2023). [in Russian]