

УДК (UDC) 621.86

УТОЧНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ СПЕЦИАЛЬНЫХ КОЛЕСНЫХ ШАССИ И ТЯГАЧЕЙ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ

REFINEMENT OF THE CHARACTERISTICS OF THE AERODYNAMIC RESISTANCE TO THE MOVEMENT OF SPECIAL WHEELED CHASSIS AND TRACTORS BASED ON THE USE OF COMPUTATIONAL GAS DYNAMICS METHODS

Таричко В.И., Шалупина П.И.
Tarichko V.I., Shalupina.P.I.АО «Брянский автомобильный завод» (Брянск, Россия)
Bryansk Automobile Plant JSC (Bryansk, Russian Federation)

Аннотация. Точная оценка характеристик аэродинамического сопротивления движению важна для предварительного выбора параметров двигателя, трансмиссии и ходовой части специального колесного шасси или тягача. Сила сопротивления движения влияет на динамические характеристики автомобиля. Существующие расчетные методики допускают широкий разброс коэффициента аэродинамического сопротивления, что усложняет задачу по предварительному выбору параметров автомобиля. Целью настоящей статьи является уточнение и развитие инженерной методики проведения тягово-динамических расчетов специальных колесных шасси и тягачей на основе учета результатов компьютерного моделирования, выполненных с использованием методов вычислительной гидро- и газодинамики (CFD-моделирования). Рассмотрена методика моделирования и результаты расчета специального колесного шасси производства АО «БАЗ».

Ключевые слова: колесное шасси, грузовой автомобиль, аэродинамика, сопротивление движению, вычислительная газодинамика, CFD-моделирование.

Дата принятия к публикации: 28.08.2021
Дата публикации: 25.09.2021

Сведения об авторах:

Таричко Вадим Игоревич – кандидат технических наук, заместитель генерального директора – главный конструктор АО «Брянский автомобильный завод», e-mail: 32.6909@mail.ru.

Шалупина Павел Игоревич – начальник конструкторского бюро расчетов и надежности АО «Брянский автомобильный завод», e-mail: p.shalupina@gmail.com.

Abstract. An accurate assessment of the characteristics of the aerodynamic resistance to movement is important for the preliminary selection of the parameters of the engine, transmission and chassis of a special wheeled chassis or tractor. The strength of the movement resistance affects the dynamic characteristics of the car. The existing calculation methods allow for a wide variation of the aerodynamic drag coefficient, which complicates the task of preliminary selection of car parameters. The purpose of this article is to clarify and develop the engineering methodology for carrying out traction-dynamic calculations of special wheeled vehicles and tractors based on the results of computer modeling performed using computational fluid and gas dynamics (CFD modeling) methods. The modeling methodology and calculation results of a special wheeled chassis manufactured by JSC «BAZ» are considered.

Keywords: wheeled chassis, truck, aerodynamics, resistance to movement, computational gas dynamics, CFD-simulation.

Date of acceptance for publication: 28.08.2021
Date of publication: 25.09.2021

Authors' information:

Vadim I. Tarichko – Candidate of Technical Sciences, Deputy general director – General designer, Bryansk Automobile Plant JSC, e-mail: 32.6909@mail.ru.

Pavel I. Shalupina – Head of the Design Bureau of Calculations and Reliability, Bryansk Automobile Plant JSC, e-mail: p.shalupina@gmail.com.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-докторов наук №МД-422.2020.8

Acknowledgements

The study was supported by Presidential Grant for Governmental Support to Young Russian Scientists No. №MD-422.2020.8

1. Введение

Одним из первоначальных этапов проектирования специальных колесных шасси и тягачей является проведение тягово-динамических расчетов для обоснования основных конструктивных и технических решений в части выбора силового агрегата, подбора оптимальных параметров трансмиссии и ходовой части. Традиционно подобные расчеты выполняются на основе известных положений теории движения автомобиля [1], адаптированных в виде отраслевых инженерных методик для применения в области разработки и создания специальных колесных шасси и тягачей [2, 3].

Анализ многолетнего опыта проектирования, испытаний и эксплуатации специальных колесных шасси и тягачей показал, что результаты тягово-динамических расчетов в части оценки максимальных скоростей движения, как правило, оказываются ниже, чем в условиях реальной эксплуатации. В некоторых случаях разница между результатами тягово-динамических расчетов и испытаний бывает весьма существенной (до 15 км/ч).

Кроме того, возникают ситуации, когда тягово-динамические расчеты, проводимые на начальных этапах проектирования по существующим методикам, показывают пограничные результаты. То есть значения вычисляемых параметров оказываются близкими к предельным (допустимым) значениям, требуемым нормативно-технической документацией. В первую очередь, это относится к вычислению максимальных скоростей движения и преодолеваемых уклонов.

В связи с этим перед конструктором специальных колесных шасси и тягачей возникает некоторая неопределенность: либо утвердить принятые на основе тягового расчета принципиальные решения в части выбора силового агрегата и элементов трансмиссии и взять на себя риск неудачного прохожде-

ния испытаний, либо переработать конструкцию трансмиссии, выбрать другой силовой агрегат или провести работы по совершенствованию формы проектируемого изделия, что приведет к его необоснованному удорожанию.

Такие ситуации создают предпосылки для дальнейшего совершенствования отдельных положений применяемых методик тягово-динамических расчетов. Существуют различные направления их дальнейшего развития и уточнения, одним из которых является уточнение коэффициента аэродинамического сопротивления специальных колесных шасси и тягачей C_x при движении, используемого при расчете коэффициента обтекаемости k_0 . Как известно, коэффициент аэродинамического сопротивления показывает отношение силы лобового сопротивления F движению автомобиля к произведению скоростного напора Q на площадь его миделя S и в целом характеризует способность автомобиля к преодолению аэродинамического сопротивления воздуха [3]:

$$C_x = F / (Q \cdot S).$$

В существующих методиках тягово-динамических расчетов специальных колесных шасси и тягачей коэффициент обтекаемости обычно принимают $k_0 = 0,5...0,7$ в соответствии с рекомендациями [3]. Этим значениям соответствует коэффициент аэродинамического сопротивления $C_x = 0,78...1,10$ [3].

Подобный разброс значений коэффициента аэродинамического сопротивления порождает дополнительную неопределенность при проведении тягово-динамических расчетов и стремление конструктора к не всегда оправданному завышению рассматриваемого коэффициента (в запас).

Уточнение коэффициента в настоящее время возможно на основе моделирования обтекания исследуемого изделия при помощи методов вычислительной гидро- и газодинамики (CFD-моделирование, CFD –

Computational Fluid Dynamics). Для нахождения численного решения используется метод конечных объемов [4-6]. Такие методы нашли широкое применение в современной инженерной практике. Проведение расчетов с их помощью позволяет с высокой степенью точности и достоверности определить значения динамических и энергетических характеристик потока воздуха при обтекании его потоком исследуемого изделия.

Таким образом, целью настоящей статьи является уточнение и развитие инженерной методики проведения тягово-динамических расчетов специальных колесных шасси и тя-

гачей на основе учета результатов CFD-моделирования.

Для этого в стационарной постановке проведено CFD-моделирование обтекания потоком встречного воздуха при различных скоростях движения ряда моделей специальных колесных шасси и тягачей производства Акционерного общества «Брянский автомобильный завод» (АО «БАЗ»).

В общей сложности объектами исследований в настоящей работе стали 7 образцов специальных колесных шасси и тягачей полной массы (рис. 1).

а)



б)



в)



г)



д)



е)



Рис. 1. Специальные колесные шасси и тягачи производства АО «БАЗ»: а – специальное колесное шасси БАЗ-6909; б – специальное колесное шасси БАЗ-69092; в – специальное колесное шасси БАЗ-69099; г – седельный тягач БАЗ-6403; д – балластный тягач БАЗ-6306; е – опытное корпусное шасси КСКШ

В том числе объектами исследований стали:

- рамные шасси БАЗ-6909, БАЗ-69092, БАЗ-69099;
- седельные тягачи БАЗ-6402, БАЗ-6403;
- балластный тягач БАЗ-6306.

Указанные машины находятся в длительной эксплуатации и в их конструкции применяются механические коробки переключения передач.

Кроме того, в данной работе исследовалось опытное корпусное специальное колёсное шасси КСКШ, особенностью которого является применение автоматической коробки переключения передач.

2. Инженерный расчет

Первоначально тягово-динамический расчет представленных специальных колесных шасси и тягачей проведен на основе традиционно применяемой в АО «БАЗ» методики, включающей следующие шаги.

1. Оценка потерь мощности двигателя.

2. Для шасси с автоматической трансмиссией – построение характеристики совместной работы двигателя и гидротрансформатора автоматической коробки передач по нагрузочным параболом для характерных точек работы гидротрансформатора:

$$M_i = \rho \cdot \lambda_i \cdot n_{об}^2 \cdot D_a^5,$$

где i – номер передаточного отношения; ρ – плотность рабочей жидкости; D_a – диаметр гидротрансформатора.

3. Для шасси с автоматической трансмиссией – расчет частот вращения n_T и крутящих моментов M_T турбины:

$$n_T = n_{дв} \cdot u_T, \quad M_T = M_{дв} \cdot k,$$

где $n_{дв}$ – частота вращения коленчатого вала двигателя; u_T – передаточное отношение гидротрансформатора; k – коэффициент преобразования крутящего момента.

4. По следующим зависимостям рассчитываются соответственно динамический фактор по сцеплению $D_{сц}$, скорость движения V_i на i -ой передаче механической или автоматической коробки передач, тяговая сила P_{k_i} на ведущих колесах, динамический

фактор по двигателю D_l и сила P_{ω_l} сопротивления воздуха движению специальных колесных шасси и тягачей:

$$D_{сц} = K_d \cdot \psi, \quad V_i = 0,377 \cdot R \cdot \frac{n_T}{i_{общ}},$$

$$P_{k_i} = M_T \cdot i_{общ} \cdot \frac{\eta_T}{R}, \quad D_l = \frac{P_{k_i} - P_{\omega_l}}{G \cdot g},$$

$$P_{\omega_l} = k \cdot H \cdot B \cdot \frac{(V_i)^2}{3,6^2},$$

где K_d – коэффициент сцепного веса; R – радиус ведущего колеса; $i_{общ}$ – общее передаточное число трансмиссии; η_m – коэффициент полезного действия трансмиссии; B, H – длина и высота площади миделя специальных колесных шасси и тягачей соответственно.

Результаты тягово-динамических расчетов по традиционной методике и их сравнение с результатами испытаний приведены в таблице.

Таблица

Результаты тягово-динамических расчетов специальных колесных шасси и тягачей

Заводской индекс модели	Максимальная скорость образца, км/ч			Разница между результатами испытаний и расчетами, км/ч
	по требованиям нормативной документации	по результатам испытаний	по результатам расчетов	
69092	80	89,1	77,4	11,7
6402	70	77,5	66,6	10,9
6403	70	79,0	66,6	12,4
6306	60	68,8	57,5	11,3
69099	50	78,2	66,3	11,9
6909	70	77,4	70	7,40
КСКШ	80	–	80,5	–

На основе анализа приведенных данных можно сделать следующие выводы:

- результаты испытаний в части определения максимальной скорости движения специальных колесных шасси и тягачей в среднем на 10,9 км/ч больше, чем тот же показатель, определенный расчетным путем по традиционной методике;

- ожидаемая максимальная скорость движения опытного корпусного шасси КСКШ по асфальтобетонной дороге в хорошем состоянии составила 80,5 км/ч. Полученное значение незначительно превышает минимальный порог, определенный условиями нормативно-технической документации, в связи с чем целесообразно уточнение характеристик сопротивления воздуха движению.

3. Численное моделирование

Таким образом, требуется уточнение отдельных положений принятой методики тягово-динамического расчета, в частности, вычисления коэффициента аэродинамического сопротивления.

Для этого в ходе исследования были разработаны газодинамические модели обтекания потоком воздуха специального колесного шасси при различных скоростях движения (от 5 до 100 км/ч с шагом 5 км/ч).

Для этого разработана конечно-объемная сеточная модель исследуемой области течения (рис. 2).

Для исключения краевых эффектов размеры области по длине и ширине приняты в пять раз больше габаритов исследуемого специального колесного шасси и тягачей. При этом принимаемая для расчета трехмерная твердотельная модель вычитается из области течения при помощи булевой операции и учитывает конструктивные особенности обитаемых отделений, корпусов, выступающих частей, элементов системы поддресоривания и колёс.

Для численного решения поставленной задачи используется математическая модель на основе комплекса уравнений [8]:

- дифференциальные уравнения неустойчившегося пространственного движения сжимаемой вязкой жидкости (уравнения Навье-Стокса):

$$\frac{d\vec{W}}{dt} = \vec{J} - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad } p + \nu \Delta \vec{W} + \frac{1}{3} \nu \cdot \text{grad}(\text{div } \vec{W}),$$

где \vec{J} – вектор массовых сил; ρ – плотность газа; p – давление; \vec{W} – вектор скорости; t – модельное время;

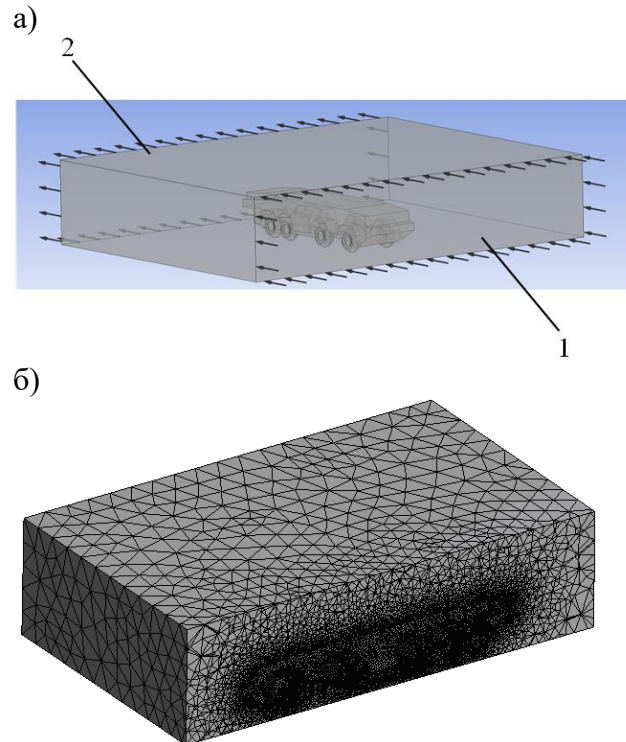


Рис. 2. Конечно-объемная модель для исследования обтекания потоком воздуха на примере корпусного специального колёсного шасси: а – расчетная схема; б – сеточная модель (1 – вход в расчетную область; 2 – выход из расчетной области)

- уравнения моментов количества движения (второе уравнение Эйлера):

$$\int_F \rho V_n (\vec{r} \times \vec{V}) dF = \int_V \rho (\vec{r} \times \vec{R}) dV + \int_F (\vec{r} \times \rho \vec{n}) dF,$$

где r – радиус-вектор; F – контрольная поверхность; V_n – нормальная компонента скорости к площадке dF ; V – контрольный объем; (n) – нормаль к площадке dF ;

- уравнения баланса расходов:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0,$$

где V_x, V_y, V_z – компоненты вектора скорости в глобальных декартовых координатах;

- стандартная k - ε модель турбулентного движения. При этом турбулентная (вихревая) вязкость μ_t рассчитывается путем объединения кинетической энергии турбулентности k и скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ε :

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon},$$

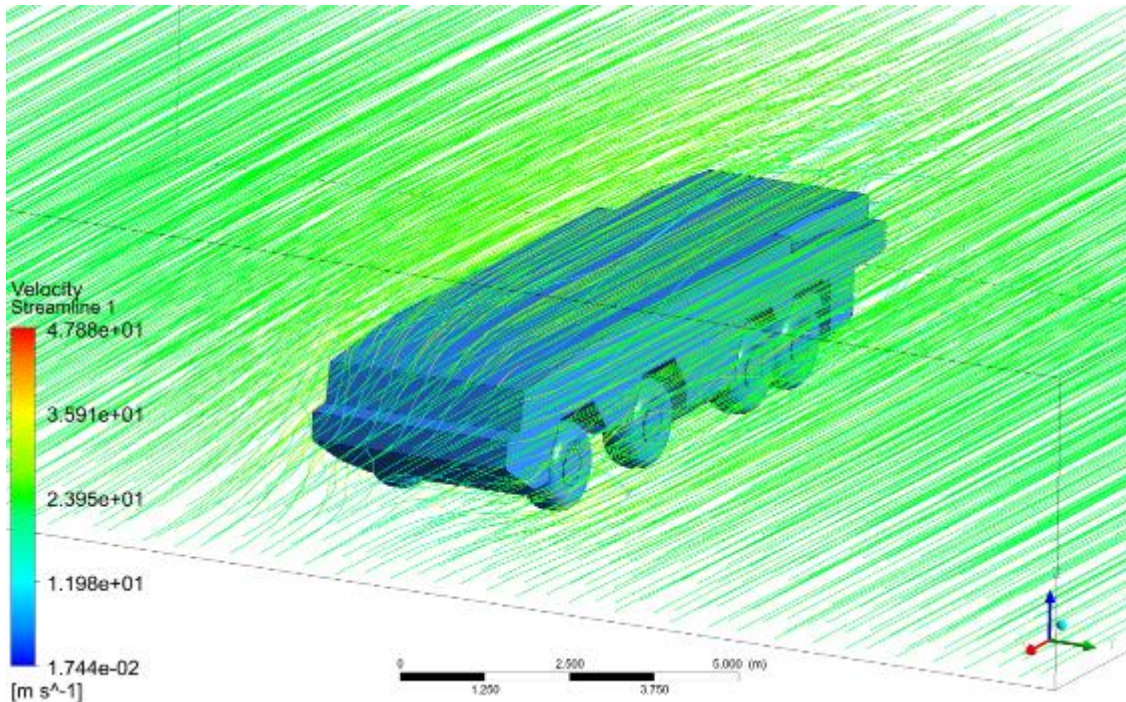
где C_μ – константа [8].

Результаты CFD-моделирования представляются в виде картин обтекания шасси и тягачей воздухом (рис. 3, а) и полей давления в различных сечениях (рис. 3, б).

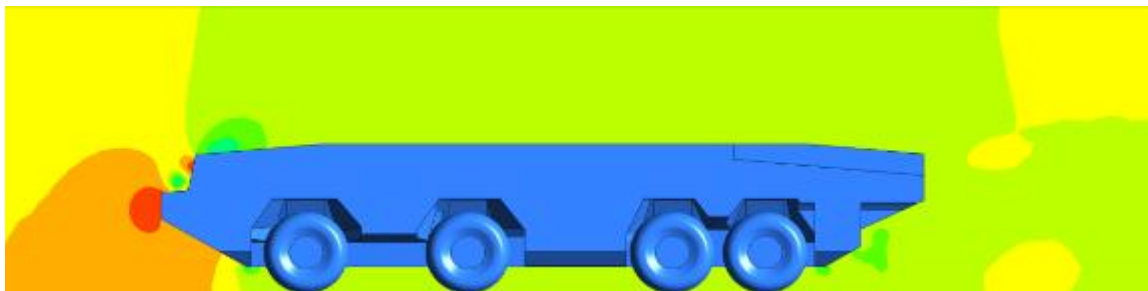
По результатам моделирования получены зависимости лобового сопротивления дви-

жению специальных колесных шасси и тягачей от скорости их движения. Для сравнения результатов, полученных по традиционной методике и численным методом, выполнено наложение полученных зависимостей.

а)



б)



в)



Рис. 3. Пример визуализации результатов CFD-моделирования КСКШ: а – распределение скоростей потока воздуха при обтекании корпуса специального колесного шасси; б – распределение полей давления при обтекании корпуса специального колесного шасси (в среднем сечении); в – распределение полей давления при обтекании корпуса специального колесного шасси (в сечении колесной колеи)

Анализ результатов численного моделирования показал: для рамных специальных колесных шасси и тягачей коэффициент обтекаемости близок к минимально рекомендуемому [3] и колеблется в пределах 0,58...0,60, а для корпусного специального колёсного шасси значение того же коэффициента оказалось выше рекомендуемого – 0,74...0,76.

На рис. 4 приведены результаты сравнения результатов расчета для рамных специальных колесных шасси и тягачей на примере шасси БА3-6909 и корпусного шасси.

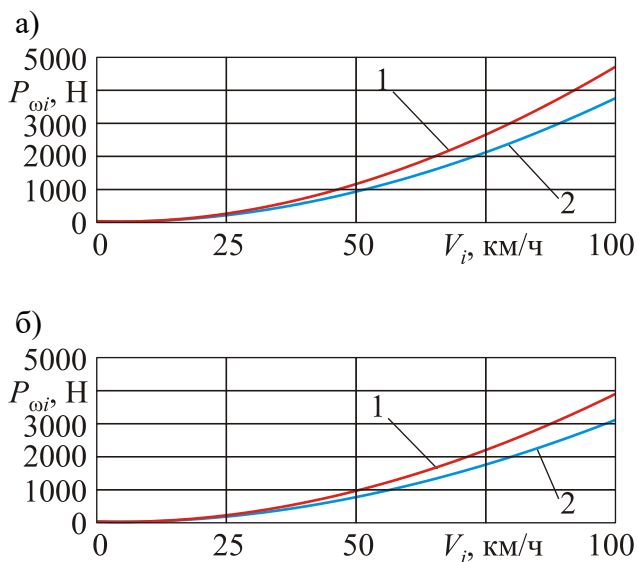


Рис. 4. Сравнение результатов расчета: а – по рамным специальным колесным шасси и тягачей (на примере специального колесного шасси БА3-6909); б – по корпусному специальному колёсному шасси (1 – по традиционной методике; 2 – при помощи численного CFD-моделирования)

Анализ графиков, представленных на рис. 4, показал:

- сопротивление движению рамных специальных колесных шасси и тягачей, рассчитанное при помощи CFD-моделирования, в целом ниже, чем полученное по традиционной методике. Максимальная разница между полученными результатами составляет до 17%.

- сопротивление воздуха движению корпусного специального колёсного шасси, рас-

считанное при помощи CFD-моделирования, несколько выше, чем полученное по традиционной методике тягово-динамического расчета. Максимальная разница между полученными результатами составляет до 13%.

Согласно полученным данным значения коэффициентов обтекаемости для специального колесного шасси и тягача одинаковой конструкции варьируются в пределах 0,02...0,03, что может быть связано с некоторой погрешностью применяемого численного метода. Кроме того, различие в полученных результатах может свидетельствовать о принципиальном непостоянстве коэффициента, либо непостоянстве показателя степени при скорости в формуле для расчета скоростного напора воздуха [9].

Далее на основе уточненного значения коэффициента аэродинамического сопротивления введены поправки в формулу расчета силы сопротивления воздуха при движении специальных колесных шасси и тягачей, в результате чего:

- для рамных специальных колесных шасси и тягачей получены расчетные значения максимальных скоростей движения, приближенные к действительным (рис. 5);

- для специального корпусного колесного шасси установлено, что максимальная ожидаемая скорость составит 77,5 км/ч, что свидетельствует о необходимости пересмотра некоторых принципиальных решений, принятых при проектировании изделия.

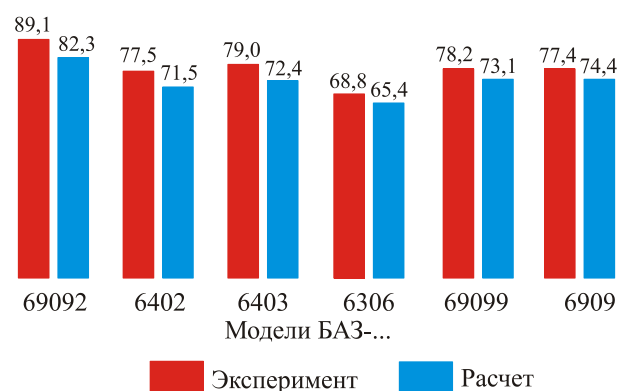


Рис. 5. Сравнение действительных и расчетных максимальных скоростей движения V_{max} (км/ч) рамных специальных колесных шасси и тягачей, уточненных по результатам CFD-моделирования

Из рис. 5 видно, что ожидаемая максимальная скорость движения рамных специальных колесных шасси и тягачей, уточненная по результатам CFD-моделирования, приближена к действительным значениям по сравнению с расчетами по традиционной методике. Однако разница между результатами расчетов и испытаний может достигать до 6,8 км/ч, что свидетельствует о возможности дальнейшего совершенствования положений принятой методики расчета и по другим направлениям.

В то же время результаты моделирования аэродинамики специального корпусного шасси КСКШ показали, что принимаемые по рекомендациям значения коэффициента обтекаемости занижены, в связи с чем искажаются значения максимальных достижимых скоростей движения. Во избежание потенциальных проблем при проведении натурных испытаний предприняты различные меры по снижению сопротивления движению корпусного шасси со стороны набегающего потока воздуха и другие, касающиеся основных технических решений, а именно:

- для обеспечения требуемого преодолеваемого угла уклона в совокупности с обеспечением максимальной скорости движения проведена серия оптимизационных расчетов для подбора оптимальных параметров механической части трансмиссии КСКШ в части выбора передаточных чисел таких агрегатов, как раздаточная коробка, главные передачи и колесные редуктора;

- выполнены исследования по анализу и обоснованию применения шин, обеспечивающих более высокие динамические качества СКШ по сравнению с применяемыми серийно;

- выполнены поисковые оптимизационные исследования по совершенствованию формы корпуса специального колесного шасси для обеспечения лучшего его обтекания потоком воздуха при движении.

4. Основные результаты и выводы

В статье рассмотрен подход к уточнению результатов тягово-динамических расчетов рамных и корпусных специальных колесных

шасси на основе учета результатов CFD-моделирования обтекания обитаемых отделений и корпусов встречным потоком воздуха при движении в части возникающего при этом сопротивления.

На основе проведенных исследований сделаны следующие выводы.

1. Уточнение коэффициента аэродинамического сопротивления движению специальных колесных шасси и тягачей целесообразно проводить на основе применения методов вычислительной гидро- и газодинамики, которые позволяют получить достаточно корректные и точные результаты.

2. Для рамных специальных колесных шасси и тягачей значения коэффициентов обтекаемости, полученных по результатам CFD-моделирования в целом ниже рекомендуемых [3] и находятся в пределах 0,58...0,60. В совокупности с результатами сравнения расчетных и экспериментальных данных, полученные данные свидетельствуют о необоснованном завышении коэффициента обтекаемости рамных специальных колесных шасси и тягачей при расчетах по традиционной методике.

3. Уточненные данные о коэффициентах аэродинамического сопротивления движению и обтекания рамных специальных колесных шасси и тягачей позволили уточнить результаты тягово-динамических расчетов и приблизить расчетные величины к наблюдаемым в действительности. Однако, существует разница между расчетными и экспериментальными данными, что свидетельствует о возможности дальнейшего совершенствования традиционной методики тягово-динамического расчета.

4. Введение уточненного коэффициента аэродинамического сопротивления движению специальных колесных шасси и тягачей в тягово-динамические расчеты, помимо прочего, оправдано при получении граничных значений тяговых характеристик, рассчитываемых с традиционными допущениями и устанавливаемых нормативно-технической документацией на проектируемые изделия, с целью обоснованного принятия решений о необходимости пересмотра принятых технических решений.

5. Выполненное в работе CFD-моделирование обтекания корпуса КСКШ потоком воздуха показало, что коэффициент его аэродинамического сопротивления составляет порядка 1,14...1,16, что превосходит рекомендуемые литературой [3] значения 0,78...1,10. Кроме того, в случае использования различного оборудования, имеющего большую наветренную площадь, необходимо производить дополнительное уточнение величины сопротивления движению КСКШ, поскольку это может оказать существенное влияние на получаемые результаты.

Список литературы

1. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.

2. Руководящий материал министерства РМО 1749-66 «Тягово-динамические расчеты автопоездов».

3. Антонов А.С., Голяк В.К. Армейские автомобили: конструкция и расчет. Часть первая: типы автомобилей, компоновка, силовые передачи. М.: Военное издательство Министерства обороны СССР, 1970. 542 с.

4. Вершинский А.В., Лагереv И.А., Шубин А.Н., Лагереv А.В. Численный анализ металлических конструкций подъемно-транспортных машин. Брянск: РИО БГУ, 2014. 186 с. DOI:10.5281/zenodo.1202237

5. Вершинский А.В., Лагереv И.А., Шубин А.Н., Лагереv А.В. Расчет металлических конструкций подъемно-транспортных машин методом конечных элементов. Брянск: РИО БГУ, 2015. 210 с. DOI: 10.5281/zenodo.1202240

6. Кiyutiна, И.И. Формирование компетенций в области современных сквозных цифровых технологий у обучающихся по направлению «Реклама и связи с общественностью» / И.И. Кiyutiна, И.А. Лагереv // Ученые записки Брянского государственного университета. 2020. №2. С. 11-15.

7. Лагереv А.В., Мильто А.А., Лагереv И.А. Универсальная методика динамического анализа гидравлических кранов-манипуляторов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2013. №3. С. 24-31.

6. Полученные результаты численного CFD-моделирования использованы при исследованиях по оптимизации формы корпуса и снижения аэродинамического сопротивления движению КСКШ, а также для пересмотра принципиальных технических решений в проектируемом изделии (подбора оптимальных параметров механической части трансмиссии).

7. Проверка результатов расчета возможна с помощью экспериментальных исследований как на макетах [10], так и на натуральных машинах [11, 12].

References

1. Smirnov G.A. *Teoriya dvizheniya kolesnykh mashin* [Theory of the movement of wheeled vehicles]. Moscow, Mashinostroenie, 1990. 352 p. (In Russian).

2. Guidance material of the Ministry of RMO 1749-66 «Traction and dynamic calculations of road trains» (In Russian).

3. Antonov A.S, Golyak V.K. *Armeyskie avtomobili: Konstruktsiya i raschet. Chast pervaya: tipy avtomobiley, komponovka, silovye peredachi* [Army vehicles: design and calculation. Part One: types of cars, layout, power transmission]. Moscow, Voennoe Izdatelstvo Ministerstva oborony SSSR, 1970. 542 p. (In Russian).

4. Vershinckii A.V., Lagerev I.A., Shubin A.N., Lagerev A.V. *Chislennyi analiz metallicheskih konstruktsii podmno-transportnykh mashin* [Numerical analysis of metal constructions of lifting-transport machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Universitet, 2014. 186 p. DOI:10.5281/zenodo.1202237 (In Russian).

5. Vershinckii A.V., Lagerev I.A., Shubin A.N., Lagerev A.V. *Raschet metallicheskih konstruktsii podmno-transportnykh mashin metodom konechnykh elementov* [Calculation of metal structures of lifting and transport machines by the finite element method]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Universitet, 2015. 210 p. DOI: 10.5281/zenodo.1202240 (In Russian).

6. Kiyutina I.I., Lagerev I.A. Formation of competencies in the field of modern end-to-end digital technologies for students in the direc-

