

УДК 629.113

Д.Р. Стахин, К.О. Гончаров

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ТРИЦИКЛА КЛАССА SHELL ECO-MARATHON

Нижегородский государственный технический университет им П.Е. Алексеева

Рассматривается болид класса Shell Eco Marathon, главной задачей при эксплуатации которого является преодоление наибольшего расстояния при минимальных затратах энергии (жидкого топлива или альтернативного источника). С целью обеспечения технико-эксплуатационных показателей болида целесообразно решить задачу по снижению массы болида, коэффициента лобового сопротивления воздуха, выбора экономичной силовой установки. Представлены основные формулы для тягово-динамического расчета двигателя. По результатам расчетов сделан вывод об экономичности силовой установки. Также описаны принцип электродвигателя и основные его преимущества перед двигателями внутреннего сгорания.

Ключевые слова: Электродвигатель, трицикл, топливная экономичность, Shell Eco Marathon.

Соревнования автомобилей с минимальным расходом топлива Shell Eco-Marathon проводятся по всему миру. Впервые данный марафон был проведен нефтяной компанией Shell в 1939 году. Главная цель ежегодных соревнований - преодолеть наибольшее расстояние на одном литре топлива. В 1985 году автомобиль-победитель Эко-Марафона показал результат, позволявший проехать на одном литре топлива расстояние от Роттердама до Лондона. 30 лет спустя прототип на сжатом природном газе (КПГ) французской команды Microjoule La Joliverie проехал на одном литре топлива 2551,8 км, что равняется расстоянию от Роттердама до Москвы, и показал абсолютно лучший результат 2016 года.

Уменьшение загрязнений атмосферного воздуха токсичными веществами, выделяемыми промышленными предприятиями и автомобильным транспортом, является одной из задач современных автопроизводителей. На автомобильный транспорт приходится порядка 40% всех загрязнений воздуха. Автомобиль в среднем выбрасывает в год 135 кг окиси углерода, 25 кг окислов азота, 20 кг углеводородов, от 7 до 10 кг бензопирена, 4 кг двуокиси серы, 1,2 кг твердых частиц.

На данный момент в мире насчитывается порядка 500 млн автомобилей. Их выбросы в совокупности в год составляют порядка 67,5 мегатонн окиси углерода и 12,5 мегатонн окислов азота.

В связи с этим становится актуальной работа в области развития и популяризации автомобильного транспорта на альтернативных источниках энергии. В НГТУ им. П.Е. Алексеева в студенческом конструкторском бюро ведется разработка электрического трицикла класса Shell Eco-Marathon, к которому предъявлены требования по высокой экономичности и экологичности. Трицикл представляет собой трехколесное транспортное средство рамной конструкции, закрытое корпусом из композиционных материалов, с лежащим расположением пилота и управляемыми передними колесами. Привод осуществляется через заднее ведущее мотор-колесо.

Таблица 1

Исходные данные расчета координата центра масс

№	Элемент	Масса, кг	Координата X, м	Координата Y, м
1	Пилот	75	0,751	0,129
2	Рама	20	1,178	0
3	Аккумулятор	10	1,590	0,04
4	Рулевое управление	3	-0,93	0,05
5	Мотор колесо	7	2,11	0
6	Управляемые колеса	3	0	0,03

Исходя из найденных технических решений, была предложена компоновочная схема трицикла, для которой проведен расчет центра масс. Для этого по 3D-модели трицикла в программе Autodesk Inventor были определены координаты основных элементов и узлов болида (рама, аккумулятор, рулевое управление) и пилота по осям (табл. 1).

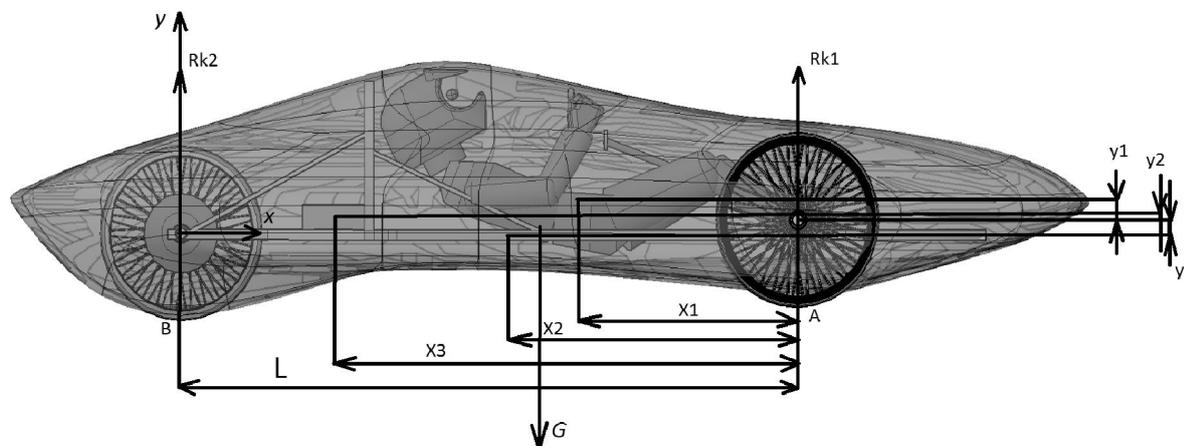


Рис. 1. Схема для определения координат центра масс трицикла

Определим координаты центра масс системы по соотношениям (табл. 2):

$$x_c = \frac{\sum m_i \cdot x_i}{\sum m_i} \quad y_c = \frac{\sum m_i \cdot y_i}{\sum m_i} ,$$

где i - порядковый номер элемента, указанного в табл. 1,

m - масса элемента,

x_c, y_c - координаты центра масс по оси x и y соответственно.

Таблица 2

Координаты центра масс

№	$m_i, \text{кг}$	$m_i \cdot x_i$	$m_i \cdot y_i$	$x_c, \text{м}$	$y_c, \text{м}$
1	75	56,325	9,675	0,913	0,005
2	20	23,56	0		
3	10	15,9	0,4		
4	3	-2,79	0,15		
5	7	14,805	0		
6	3	0	0,09		
Сумма	118	107,8	0,64		

Для наиболее оптимального размещения составных частей болида необходимо вычислить нормальную нагрузку на передние и задние колеса.

Нормальная нагрузка R_{k1} (Н), действующая на переднюю ось болида, из уравнения моментов действующих сил относительно оси задних колес:

$$\sum M(R_{k2}) = 0$$

$$G \cdot X_c - R_{k1} \cdot L = 0$$

$$R_{k1} = G \cdot X_c / L = m \cdot g \cdot X_c / L = 118 \cdot 9,81 \cdot 0,913 / 2,11 = 500,9 \text{ Н.}$$

Нормальная нагрузка R_{k2} (Н), действующая на заднее колесо болида, из уравнения моментов действующих сил относительно оси передних:

$$\sum M(R_{k1}) = 0$$

$$R_{k2} \cdot L - G \cdot (L - X_c) = 0$$

$$R_{k2} = G \cdot (L - X_c) / L = m \cdot g \cdot (L - X_c) / L = 118 \cdot 9,81 \cdot (2,11 - 0,913) / 2,11 = 656,7 \text{ Н}$$

Из расчетов видно, что нагрузка распределена в соотношении 43,3% - передняя ось,

56,7% - задняя ось. Большую нагрузку воспринимает ведущее заднее колесо, которое должно обеспечивать отсутствие проскальзывания между колесом и поверхностью во время старта болида. Таким образом, полученные координаты центра масс и нагрузка на оси позволяют оптимизировать компоновочную схему трицикла с целью более оптимального распределения массы отдельных элементов.

В ходе работы над проектированием трицикла были проведены расчеты с целью выбора оптимального силового агрегата.

Анализ коллекторных и бесколлекторных бытовых электродвигателей, применяемых на различном технологическом оборудовании, показал, что их габариты и масса слишком велики для установки на трицикл, участвующий в соревнованиях. В связи с этим, одним из решений стало применение мотор-колеса (рис. 2), наиболее приспособленного для работы в условиях движения. В комплекте с мотор-колесом прилагается микроконтроллер (рис. 3), который обеспечивает взаимосвязь компонентов и позволяет регулировать крутящий момент электромотора. Благодаря применению мотор-колеса может быть использована система рекуперации энергии при торможении, которая позволит несколько увеличить запас хода болида.

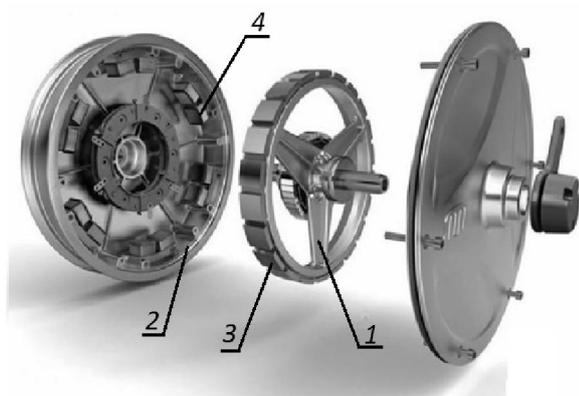


Рис. 2. Принципиальная схема мотор-колеса:

1 – статор; 2 – ротор;
3 - магниты, 4 - обмотки



Рис. 3. Комплект мотор-колеса:

1 - спицевое мотор-колесо; 2 – контроллер;
3 - тормозные ручки; 4 - ручки газа; 5 - усилители дроп-аутов; 6 - панель управления

С целью изучения тягово-динамических характеристик трицикла с мотор-колесом проводим тягово-динамический расчет. Для проведения тягово-динамических характеристик проводим расчет безредукторного электромотора мощностью 1 кВт. Исходные данные для тягового расчета показаны в табл. 3.

Таблица 3

Исходные данные тягово-динамического расчета

Параметры	Обозначения	Значения
Мощность, кВт	P_e	1
Момент, Н·м	T_e	30
Полная масса, кг	m	110
Габаритная высота, м	H	1,225
Габаритная ширина, м	B	0,5
КПД трансмиссии	$\eta_{тр}$	0,9
Радиус колеса, м	r_d	0,3

Строим внешнюю скоростную характеристику электродвигателя. Для этого разбиваем весь диапазон значений угловой (ω_e) скорости на 10 равных частей. Задавая номинальный момент двигателя (T_e), определяем его максимальную мощность (P_e). Далее определяем значение мощности для каждого значения угловой скорости (табл. 4). Строим график внешней скоростной характеристики (рис. 4).

Таблица 4

Исходные данные внешней скоростной характеристики

Угловая скорость (ω_e), рад/с	Момент (T_e), Н•м	Мощность (P_e), Вт
6	30	100
9	30	200
12	30	340
15	30	440
18	30	580
21	30	680
24	30	780
27	30	890
30	20	980
33	10	1000

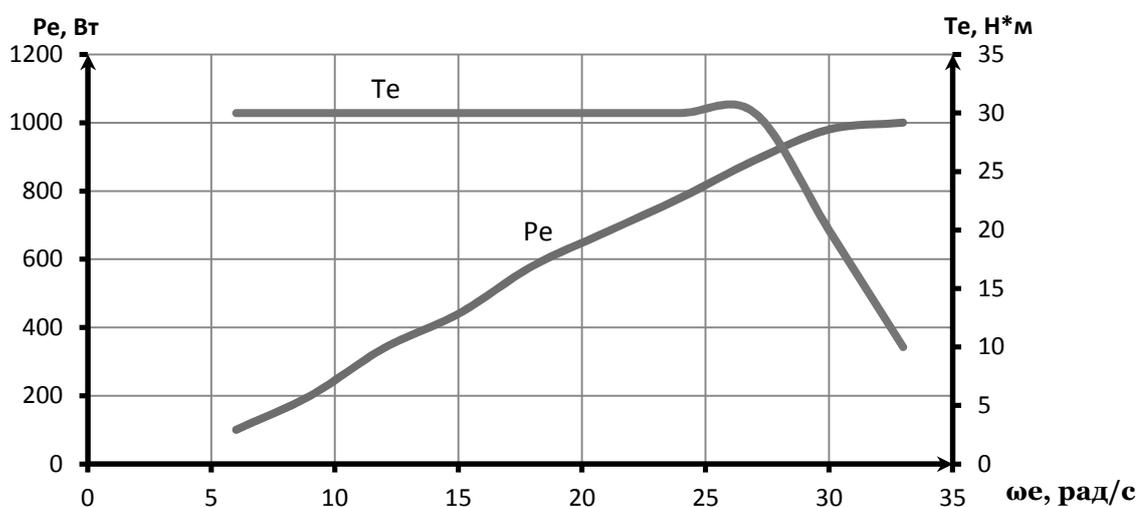


Рис. 4. График внешней скоростной характеристики болида

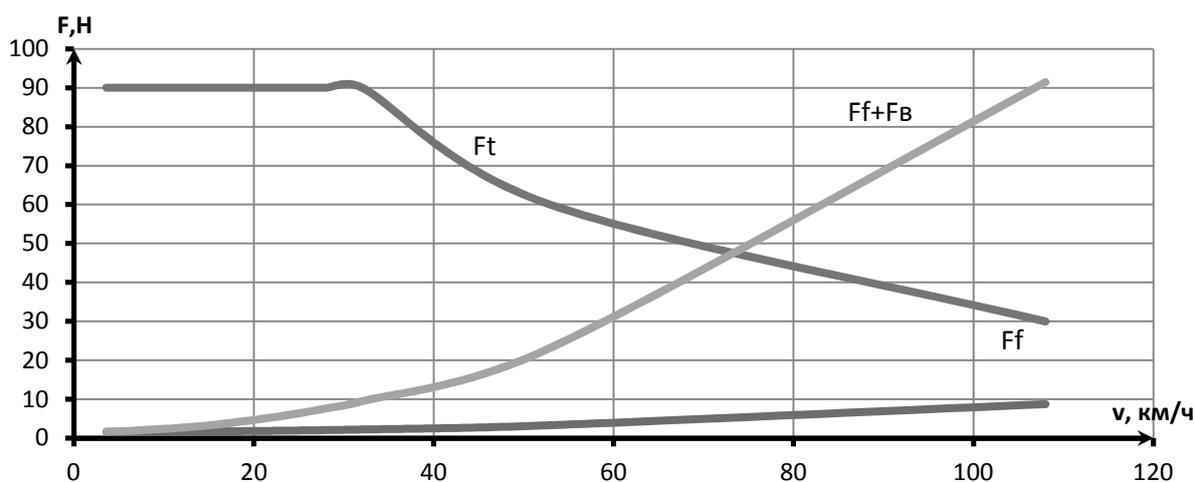


Рис. 5. График тягового баланса болида

Определяем максимальную скорость (v) в зависимости от мощности и силы тяги (F_t) [1]:

$$F_t = \frac{T_e \cdot i_{тр} \cdot \eta_{тр}}{r_d}$$

где $i_{тр}$ - передаточное число трансмиссии;
 $\eta_{тр}$ - КПД трансмиссии;
 r_d - радиус колеса, м;
 F_f - сила сопротивления качению, Н;
 F_B - сила сопротивления воздуху, Н;

$$v = 3,6 \cdot \eta_{тр} \cdot \frac{P_e}{F_t}$$

Строим график тягового баланса (силы тяги от скорости) (рис. 5). По графику можно сделать вывод, что тяговая сила на электродвигателе имеет максимальное значение с начала движения болида, что дает преимущество перед ДВС. При больших скоростях тяговая сила снижается, однако на соревнованиях Shell Eco Marathon болиды не достигают данных скоростей, что позволяет использовать болид в наиболее рациональном режиме тяговой силы.

Вычисляя фактор обтекаемости, силу сопротивления воздуху (F_B) и качению (F_f), для определения соответствующих мощностей.

$$F_B = W \cdot v^2,$$

где W - фактор обтекаемости ($\text{Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^2$).

$$W = c_x \cdot \rho \cdot A / 2,$$

где c_x - коэффициент аэродинамического сопротивления. На основании данных испытаний имитационной модели корпуса трицикла в прикладном пакете Star CCM принимаем $c_x = 0,3$;

ρ - плотность воздуха. $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$;

A - площадь миделя. Определяется из 3D модели. $A = 0,5 \text{ м}^2$;

$$F_f = f \cdot v^2,$$

где f - коэффициент сопротивления качению. Зависит от дорожного покрытия.

Принимаем $f = 0,014$.

Определяем Тяговую мощность, мощность сопротивления воздуху и мощность сопротивления качению, строим график баланса мощности (рис. 6)

$$P_t = F_t \cdot v, P_f = F_f \cdot v, P_e = F_e \cdot v.$$

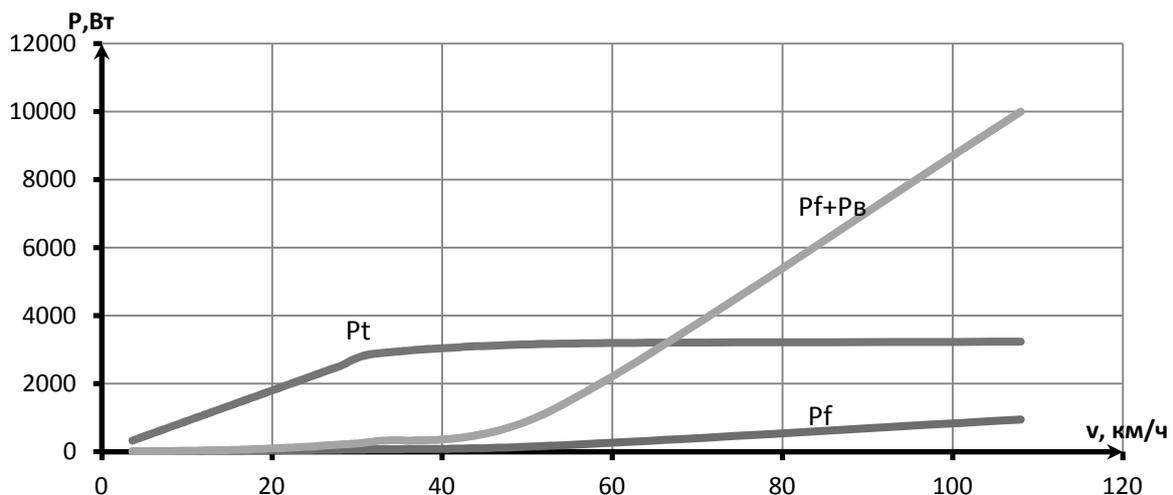


Рис. 6. График баланса мощности автомобиля

Далее, вычисляя динамический фактор болида, определяем его ускорение (рис. 7)

$$a = \frac{(D-f) \cdot g}{6},$$

где D - динамический фактор.

$$D = \frac{F_t - F_B}{m \cdot g}$$

g - ускорение свободного падения $9,81 \text{ м/с}^2$;

B - коэффициент учета вращающихся масс.

Так как у электродвигателя отсутствует трансмиссия и вращающиеся массы в самом двигателе, то для мотор-колеса принимаем значение $B = 1$.

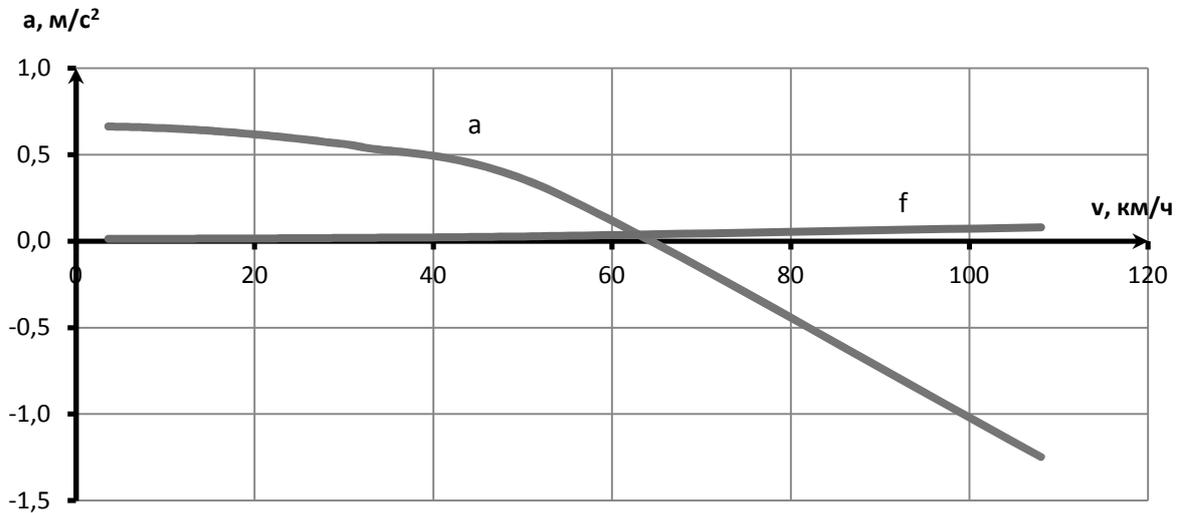


Рис. 7. График ускорения болида

Из рис. 7 видно, что с увеличением скорости ускорение трицикла уменьшается незначительно, демонстрируя преимущество перед двигателями внутреннего сгорания. Определяем удельный расход энергии мотор-колеса:

$$P_{out} = P_{in} \cdot \eta,$$

где P_{out} – выходная мощность мотор-колеса, Вт;

P_{in} – потребляемая (входная) мощность мотор-колеса, Вт;

η – КПД мотор-колеса.

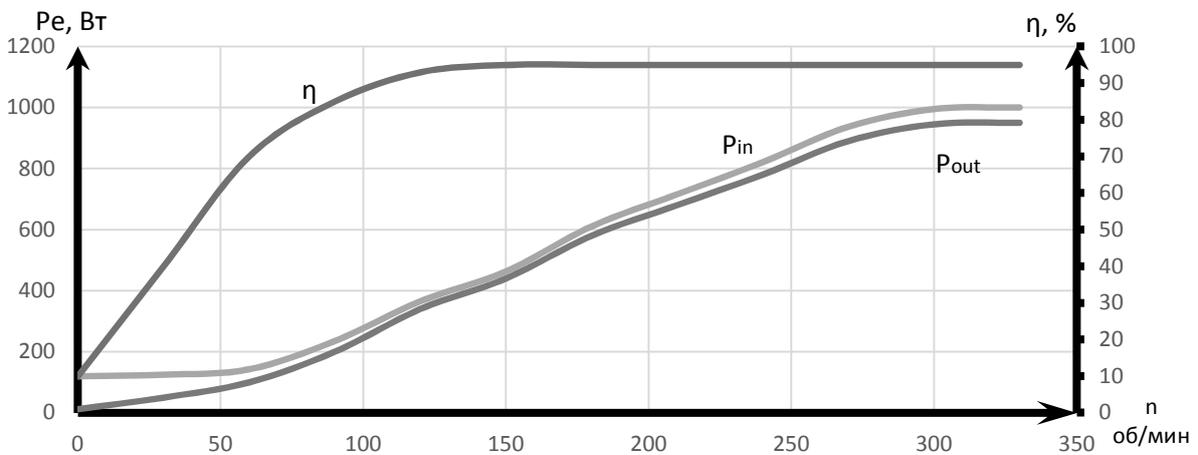


Рис. 8 График удельного расхода энергии

На рис. 8 представлен удельный расход топлива. На графике указаны выходная мощность (P_{out}) и входная мощность (P_{in}) мотор-колеса. Выходная пиковая мощность двигателя

определяется произведением входной мощности на КПД электродвигателя. Входная мощность определяет удельный расход энергии в данный момент времени в зависимости от оборотов ротора электродвигателя.

Исходя из проведенных расчетов, можно сделать вывод, что главным параметром, влияющим на экономичность болида, является мощность силовой установки. При недостаточной мощности транспортное средство теряет подвижность либо не способно набрать необходимую скорость. Принимая во внимание проведенные расчеты, можно принять, что болид, имеющий снаряженную массу 120 кг, должен быть оснащен двигателем мощностью 1 кВт для достижения наибольшего пробега на заданном количестве электроэнергии.

Из графиков можно определить максимальную скорость движения трицикла, которая составляет порядка 65-70 км/ч. Однако, в отличие от двигателя внутреннего сгорания, электродвигатели тем экономнее, чем меньше частота вращения вала электромотора, а значит, при наименьшей скорости. Принимая во внимание свойства электромотора, который при старте расходует максимальное количество энергии, необходимо обеспечить оптимальную скорость трицикла для наиболее экономного режима движения. При данных массогабаритных характеристиках принимается оптимальная скорость, равная 20-25 км/ч, которая соответствует требованиям регламента соревнований Shell Eco Marathone. Именно при данных скоростях сила сопротивления качению и сила сопротивления воздуха минимальны, в то время как сила тяги обеспечивает необходимое движение и экономичность.

Не менее важными задачами для достижения экономичности и повышения запаса хода трицикла является снижение его массы и силы сопротивления воздуха благодаря оптимизации массогабаритных характеристик и улучшению аэродинамики корпуса болида [2, 3]. Одним из решений этой задачи является применение композитных материалов при создании корпуса-монокока болида. Достаточно подробно вопрос использования композитных материалов в создании элементов спортивных автомобилей рассмотрен в трудах коллектива инженеров НГТУ им. Р.Е. Алексеева [4–6]. Адаптация технологии вакуумной инфузии композиционных материалов для получения элементов трицикла будут рассмотрены отдельно.

Библиографический список

1. **Кравец В.Н.** Теория автомобиля: учебник / В.Н. Кравец; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – 2-е изд., переработ. – Нижний Новгород, 2013. – 413 с.
2. **Гухо В.Г.** Аэродинамика автомобиля: [пер. с нем.] / В.Г. Гухо. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
3. **Мацкерле Ю.** Современный экономичный автомобиль: [пер. с чешск.] / Ю. Мацкерле. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
4. **Стахин, Д.Р.** Ультра-легкий корпус и рама для болида shell eco-marathon / Д.Р. Стахин, К.О. Гончаров // Будущее технической науки: сб. мат. XVI Международной молодежной научно-технической конференции. – НГТУ. – Нижний Новгород, 2017. – С. 314–315.
5. **Деунажев, Р.В.** Особенности создания элементов спортивных автомобилей на основе композиционных материалов / Р.В. Деунажев, А.Л. Кулагин, К.О. Гончаров // Беспилотные транспортные средства: проблемы и перспективы: сб. материалов 94 международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров. – НГТУ. – Нижний Новгород, 2016. – С. 140–141.
6. **Кулагин, А.Л.** Композиционные материалы в системах пассивной безопасности и элементах конструкции спортивных автомобилей класса «Formula Student» / А.Л. Кулагин [и др.] // Беспилотные транспортные средства: проблемы и перспективы: сб. мат. 94 международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров; НГТУ. – Нижний Новгород, 2016. – С. 145–148.

*Дата поступления
в редакцию 29.03.2018*

D. R. Stakhin, K. O. Goncharov

**THE PECULIARITIES OF SELECTION OF THE POWER UNIT TRICYCLE
CLASS SHELL ECO-MARATHON**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

The aim of the study is to select the components of the tricycle power unit to optimize the technical and operational indicators of the transport facility.

The objective of the study is to select the parameters in such a way as to ensure the maximum mileage on a single battery charge. The paper uses an analytical approach and calculation methods for determining the necessary characteristics of the power plant. Shown traction-dynamic calculation, the calculation of the center of mass of the tricycle.

The study found the coordinates of the center of mass of the object of study, the load distribution along the axes. The load ratio is 43.3% for front axle, 56.7% for rear axle. Power characteristics of the tricycle are investigated. The graphs of the external velocity characteristic, the graph of the traction balance, the power balance, the graph of the specific energy consumption.

As a result and taking into account the calculations, it can be assumed that a car with a mass of 120 kg, must be equipped with a 1 kW motor to achieve the highest mileage on a given amount of electricity. The most economical mode of travel is achieved at a speed of 20-25 km/h.

Key words: motor-wheel, tricycle, fuel economy, Shell Eco Marathon.