

Пестене на енергия и автомобили

Днес, когато в световен мащаб напред излизат екологичните проблеми, остро расте необходимостта да им отделяме все повече внимание и в училище. На тях са посветени многобройни разработки, указващи къде в учебното съдържание може да се вмъкнат елементи, свързани с опазването на природната среда. В това отношение основната трудност при изучаване на физика следва от факта, че в структурата на учебното съдържание няма един раздел, който цялостно и задълбочено да може да се посвети на екологичните проблеми, на пестенето на енергия и на всичко, свързано с тях. Едни са възможностите, които в това отношение предлага изучаването на механичните, други – на топлинните, трети – на електромагнитните явления, а най-често като че ли се срещат комплексните проблеми, вникването в които изисква знания от различни раздели на физиката..

Тъй като споменатите по-горе разработки често са разхвърляни в различни източници, по-долу представяме един подбор, който принадлежи преди всичко към механиката, защото е свързан с използването на автомобилния транспорт – един от основните потребители на органични горива, активно замърсяващ атмосферата и допринасящ за ускоряване на парниковия ефект. Разглеждане на някои проблеми е възможно в рамките на знанията от общообразователния минимум, но нерядко се налага излизане от тези рамки (както например по-долу при отчитане на съпротивлението на въздуха при движението на автомобилите). Решенията на конкретните задачи често имат недостатъка, че изискват прилагането на доста формули, включват използването на доста числа и често това допринася за замъгляване на общите изводи. Затова смятаме препоръчително учителят да подбере и разгледа измежду всички предложени по-долу задачи и коментари само тези, които смята, че ще му бъдат наистина полезни в класната или извънкласната форми на работа.

Проблемът, който обединява задачите, е пестенето на гориво при използването на автомобили, т.е. – пестенето на енергия. В нашия забързан век любителите на високи скорости са не малко и при това – най-различни. Следващата задача не е за собственици на мерцедеси и беembea – който има пари за такава кола, обикновено не мисли за цената и разхода на гориво. Тя може да бъде полезна на онези масови шофьори, които обичат да изпитат на магистралата тръпката от високата скорост в своята кола, но на бензиностанцията плащат “западната” цена на горивото с пари от изкараната с честен труд "източна" заплата.

Задача. Оценете зависимостта на разхода на гориво на лека кола от скоростта на движение.

Анализ. Ако с m означим масата на подаденото към цилиндрите на двигателя гориво, разходът на гориво за единица време dm/dt е пропорционален на мощността P , развивана от двигателя. От своя страна моментната мощност е произведение от моментната скорост на движение v и движещата сила F :

$$(1) \quad P = Fv.$$

При постоянна скорост движещата сила е равна по големина на общото действащо върху колата съпротивление. То се дължи на триенето в лагерите и зъбните колела на двигателя и ходовата част на колата, на силите, които водят до топлинни загуби в гумите и най-вече – на съпротивлението, което въздухът оказва върху движещата

се кола. Може да се смята, че с изключение на въздушното съпротивление, останалите сили не зависят от скоростта. Те зависят преди всичко от оборотите на двигателя, като разходът на гориво за преодоляването на тези сили, пресметнат за километър, е приблизително постоянен.

Следователно за оценяване зависимостта на разхода на гориво от скоростта на движение, особено при интересуващите ни високи скорости, е достатъчно под F да разбираме силата на съпротивление на въздуха.

Решение. Известно е¹, че при движение на тела с размерите на автомобил и при скорости над 1 m/s, големината на съпротивлението F , с което въздухът действа на движещо се тяло, е право пропорционална на квадрата от скоростта v на тялото:

$$(2) \quad F = kv^2.$$

Коефициентът на пропорционалност k зависи от плътността на въздуха, от напречното сечение на движещото се тяло и от неговата форма.

Заместването на F от формула (2) във формула (1) дава резултат:

$$(3) \quad P = kv^3.$$

Ако означим с η коефициентът на полезно действие на двигателя, а с q – специфичната топлина на изгаряне на бензина, то механичната мощност P и разходът на гориво dm/dt ще бъдат свързани с равенството:

$$(4) \quad P = \eta q dm/dt.$$

Търсената зависимост на разхода на гориво от скоростта следва от (3) и (4):

$$(5) \quad \frac{dm}{dt} = \frac{kv^3}{\eta q}.$$

И така, шофьори, внимание: Разходът на гориво **за единица време**, който отива за преодоляване на съпротивлението на въздуха, расте с **третата** степен на скоростта! Удоволствието да се движите с 90 km/h, вместо с 60 km/h ви коства увеличен разход на гориво повече от три пъти ($90:60 = 1,5$, а $(1,5)^3 = 3,375$)!

Коментар. 1. Направените пресмятания са верни, но все пак нещата не са толкова страшни и то поради следните две обстоятелства:

– Обикновено от значение е не моментният разход на гориво, а разходът за изминаване на единица път, например $s = 100$ km. Тъй като времето за изминаване на този път е обратно пропорционално на скоростта ($t = s/v$), общият разход на гориво за 100 km ще бъде:

$$(6) \quad m = t \frac{dm}{dt} = \frac{ks}{\eta q} v^2,$$

т.е., пропорционален е "само" на v^2 .

Тези факти дават възможност за следните разсъждения от гледна точка на "икономическите" съображения. Известно е, че в една пазарна икономика времето е пари. Във всеки конкретен случай шофьорът на колата трябва да си направи добре сметката, като предварително си изясни кое за него е по-важно: да спести време, или да спести пари. Ако примерно той пътува от София за Варна по дела,

¹ За тези, които се смущават от израза "Известно е ..." по-долу фактически показваме как може да се получи тази зависимост.

свързани с бизнес, трябва да пресметне колко лева ще му струва увеличеният разход на гориво, ако пътува с максималната възможна скорост – да означим тази сума с A . След това да пресметне колко време ще спести, пътувайки с тази скорост и колко лева би изкарал от бизнеса си за това време – да означим новата сума с B . Ако се окаже, че $A > B$, то очевидно от икономична гледна точка не си струва да шофира с максимална скорост.

Има случаи обаче, в които не времето е определящият фактор. Ако например отивате във Варна не по бизнес дела, а на почивка, няма значение дали ще пристигнете час по-рано или – час по-късно. В тези случаи двете зависимости от скоростта (пропорционалност на v^2 и на v^3) показват и без пресмятания коя стратегия за шофиране е за предпочитане.

– Поради наличието на сили на триене, които не зависят или слабо зависят от скоростта, общата зависимост на разхода на гориво за единица път от скоростта е от вида:

$$(7) \quad m = Av + Bv^2,$$

където A и B са константи, характерни за различните модели автомобили. При движение със скорости от порядък на тези, които се използват в градски условия, съпротивлението на въздуха по големина е сравнимо със силите на триене. Поради тази причина зависимостта $m \sim v^2$ е съществена наистина само при високите скорости, т.е. в извънградски условия.

Повече подробности за зависимостта на разхода на гориво от скоростта може да се намерят в статията на R. E. Barker в *American Journal of Physics*, 1976, No 1. Вярно е, че приведените в нея примери се отнасят до вече доста стари модели коли, но все пак дават представа за интересуващите ни величини.

2. Нека на основата на един прост модел оценим стойностите на коефициента k , който във формула (2) определя силата на съпротивление на въздуха. Същността на модела е в предположението, че съпротивлението на въздуха се дължи само на факта, че, подобно на едно бутало, леката кола избутва намиращият се пред нея въздух, като частиците му придобиват скоростта на колата. При това се пренебрегва влиянието на въздуха, който обтича колата отстрани, отгоре и отдолу, и следователно вискозитетът на въздуха не оказва влияние.

Ако означим с S площта на напречното сечение на колата, за единица време тя ще придава скорост v на въздуха, намиращ се в хоризонтален цилиндър с основа S и дължина v . Масата на този въздух е $\Delta M = \rho v S$, където ρ е плътността на въздуха. Когато той се движи със скорост v , кинетичната му енергия е $\Delta M v^2 / 2$ и следователно, за да се движи колата равномерно, всяка секунда двигателят трябва да извършва работа:

$$(8) \quad P = \Delta M \frac{v^2}{2} = (\rho S v) \frac{v^2}{2} = \frac{\rho S}{2} v^3,$$

за сметка на която въздухът придобива кинетична енергия.

Като сравним тази формула с формулите (1) и (2), виждаме, че в нашия опростен модел коефициентът k зависи само от напречното сечение на колата и от плътността на въздуха:

$$(9) \quad k = \rho S / 2.$$

Един по-реалистичен модел би внесъл корекции, зависещи от формата на колата, но те ще доведат само до появата на множители от порядък на 2, така че формула (9) спокойно може да се използва за оценки на интересувашите ни величини.

Като вземем предвид, че за въздуха $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$, ако напречното сечение на колата е $S = 2 \text{ m}^2$, при движението ѝ със скорост $v = 72 \text{ km/h} = 20 \text{ m/s}$, за преодоляване на въздушното съпротивление двигателят трябва да осигури мощност:

$$(10) \quad P = (\rho S/2)v^3 = 1,3 \cdot 2 \cdot 20^3 / 2 = 10,4 \text{ kW}.$$

Ако скоростта обаче е $108 \text{ km/h} = 30 \text{ m/s}$, мощността вече нараства на 35 kW .

Нека проверим дали използваният модел води до реалистични стойности на разхода на гориво. Ако заместим от (9) израза за k в (6), получаваме, че на 100 km разходът на гориво е:

$$(11) \quad m = (\rho S s / 2 \eta q) v^2.$$

Тъй като специфичната топлина на изгаряне на бензина е $4,6 \cdot 10^7 \text{ J/kg}$, а коефициентът на полезно действие на съвременните бензинови двигатели – примерно $\eta = 25 \%$, като заместим числените данни във формула (11), получаваме, че при движение със скорост $v = 72 \text{ km/h}$ разходът на гориво е $m = 4,5 \text{ kg}$.

Плътността на бензина е $0,8 \text{ kg/l}$, така че разходът в литри е $4,5/0,8 = 5,6$ литра за 100 km – едно съвсем приемливо число.

3. Обърнете внимание на следния факт, който вече е пряко свързан с пестенето на енергия. От формула (8) следва, че при движение се със скорост 72 km/h и при $\eta = 0,25$, енергията на изгаряния бензин осигурява мощност:

$$(12) \quad (\rho S / 2 \eta) v^3 = [1,3 \cdot 2 / (2 \cdot 0,25)] 20^3 = 42 \text{ kW}.$$

Но 42 kW е средната мощност, необходима за задоволяване домашните нужди от електроенергия на около 80 домакинства! Не показват ли тези числа, че от енергетична гледна точка пътуването с леки коли е едно твърде разточително удоволствие!?! Това заключение може да се подсили още, като се вземе предвид и ниският “коефициентът на запълване” на колите – у нас най-често пътуват коли с един пътник в тях – шофьора. Оттук – и един от ефективните пътища за намаляване разходите на горива, т.е. – на енергия: един добре уреден обществен транспорт, особено за пътувания на по-големи разстояния, би бил много по-изгоден и за стопанството, и за природата.

.....

Какво означава пъргава кола?

Един от показателите, по които се преценяват съвременните леки коли, е времето, за което те, тръгвайки от място, достигат скорост 100 km/h . Смята се, че една кола е достатъчно "пъргава"², ако това време е не повече от 10 s .

"Пъргавината" зависи от различни характеристики на двигателя, но основният фактор е отношението между неговата мощност и масата на колата: колкото по-мощен е двигателят и по-малка масата, толкова по-лесно се ускорява колата.

² Разбира се, не става дума за спортен тип коли!

Задача. Колко е минималното отношение между мощността на двигателя и масата на колата, което може да осигури за време 10 s ускоряване от скорост нула до скорост 100 km/h?

Решение. Като приемем движението за равноускорително, законът за скоростта при такива движения позволява да намерим ускорението a , което позволява на колата при $v_0 = 0$ m/s да достигне за време $t = 10$ s скорост $v = 100$ km/h = 27,8 m/s:

$$(1) \quad v = v_0 + at, \quad \text{т.е.} \quad a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{v}{t}.$$

Силата, която може да осигури подобно ускорение, е:

$$(2) \quad F = ma = m \frac{v}{t}.$$

При движение със скорост v мощността на тази сила е:

$$(3) \quad P = Fv = m \frac{v^2}{t}.$$

От тук следва, че мощността, която се пада на единица маса, е:

$$(4) \quad \frac{P}{m} = \frac{v^2}{t}.$$

Това е минималното отношение между мощността и масата на колата, което може да осигури необходимото ускорение. Като заместим стойностите на v и t , за него получаваме стойността 77,3 W/kg. За да намерим минималната мощност на двигателя на кола с маса $m = 1000$ kg, трябва да умножим това отношение с масата. Така получаваме, че за да бъде тази кола достатъчно пъргава, мощността на двигателя ѝ не трябва да бъде по-малка от 77,3 kW. Тъй като една конска сила (к.с) е 0,736 W, изразена чрез тази практическа единица, мощността на двигателя е $77,3/0,736 = 105$ к.с.

И така: ако за даден автомобил на килограм маса се падат по-малко от 80 W мощност на двигателя (или грубо – по-малко от една конска сила на 10 kg маса), не очаквайте той да може да достигне скорост 100 km/h за 10 s, колкото и съвършена да бъде конструкцията на двигателя, на скоростната кутия и т.н.

Коментар. 1. Ако тази задача ви хареса и пожелаете да я коментирате с вашите ученици, можете да я опростите, като търсите направо минималната мощност на двигателя за автомобил с дадена маса – напр. 1000 kg, 1500 kg и т.н., а не специфичната мощност (т.е. мощността на един килограм маса).

2. От решението на задачата не бива да оставате с впечатлението, че ако на автомобил с маса 1000 kg поставите двигател с мощност 210 к.с., то той може да достига скорост 100 km/h за 5 s – тук се намесват други фактори.

Наистина, ускорението на автомобила се осигурява от сила на триене, която е резултат от взаимодействието (при водещи задните колела) на задните гуми на колата с пътното покритие. Тъй като на задните колела се пада половината от тежестта на автомобила, натискът им върху земята ще бъде $mg/2$, а силата на триене – съответно $kmg/2$, където k е коефициентът на триене (а не както по-горе – коефициентът, определящ съпротивлението на въздуха!). Сравнението на този израз с формула (2) показва, че за да може триенето да осигури подобно ускорение, коефициентът k не трябва да бъде по-малък от:

$$(5) \quad k = \frac{2v}{gt} \approx 0,6.$$

Тази стойност на k е близка до максималната, която могат да осигурят обикновени автомобилни гуми върху нормално пътно покритие. Така, че ако поставите двигател с мощност 210 к.с. на автомобил с маса 1000 kg, няма да успеете да го ускорите до 100 km/h за 5 s – колелата му просто ще пробуксуват, без да могат да осигурят необходимото ускорение.

Разбира се, в спортните автомобили ускоренията са значително по-големи. Това се достига първо с помощта на специално конструирани гуми и, второ, като се осигури по-голямо натоварване на водещите колела. Последното може да се постигне или с увеличаване общата маса на автомобила (което си има своите ограничения, свързани както с неговата “пъргавина”, така и с разхода на гориво), или при конструирането – с мерки за оптимално приближаване на центъра на масите към оста на водещите колела.

3. Решаването на тази задача дава възможност да обърнем внимание на една съществена особеност: търсената величина (специфична мощност, т.е. мощност на килограм маса) *не е безразмерна!* Нейната числена стойност зависи от единиците, които използваме. Фактът обаче, че за всички величини използваме една и съща самосъгласувана система – SI, гарантира че ако v и t в дясната страна на формула (4) изразим съответно в метри за секунда и секунда, то числото, което ще получим, ще представлява специфичната мощност точно във ват на килограм (W/kg).

4. Вие лесно можете да заинтересувате поне някои от учениците с тези проблеми, тъй като обикновено момчетата не са безразлични към колите. Поставете им задача да съберат данни (от интернет, от проспекти и т.н.) за някои популярни модели леки коли и да проверят дали за тях е изпълнено условието, съдържащо се във формула (4).

Вземете например данните за известния спортен модел Porsche 9ff: масата му е 1326 kg, мощността – 987 к.с. Колата ускорява до 60 mph за 4,2 s. Пресметнете отношенията P/m и v^2/t и сравнете получените стойности. За какво говори получената разлика? (С разглеждане на този пример ако не за друго, то поне се упражнява преминаването от едни единици към други.)