

П. М. АЛАБУЖЕВ, О. Д. АЛИМОВ, Б. А. ШЕХОВЦЕВ

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ И РАЗМЕРНОСТЕЙ К ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ АВТОМАШИН

Теория подобия и моделирования широко применяются в технике [3, 6, 9, 11, 12], однако нам не известны работы, использующие эту теорию к динамике автомашин, а между тем, имея испытанный образец автомашины (модель), можно по формулам теории подобия и размерностей в пределах опытных данных, в известных границах, сделать заключение о выборе параметров динамически подобной автомашины.

В таблице приведены основные параметры широко распространенных легковых и грузовых автомашин. Покажем, что в пределах данной таблицы между некоторыми типами автомашин имеет место динамическое подобие.

Условимся обозначать коэффициенты подобия той же буквой, какой обозначена данная величина [1], но с индексом «с». Основной образец, принятый в качестве модели, будем помечать индексом «1», каждый следующий образец подобной модели той же буквой, но без индекса. Тогда полагая, что силы одинаково ориентированы в соответствующих точках модели и натуры, имеем при подобии:

$$\text{геометрическом} \quad t_c = \frac{t}{t_1}; \quad l_c = \frac{l}{l_1};$$

$$\text{материальном} \quad m_c = \frac{m}{m_1} = \frac{P}{P_1} = \rho_c \cdot l_c^3;$$

$$\text{динамическом} \quad F_c = \frac{F}{F_1} = m_c \cdot \frac{l_c}{l_c^2};$$

$$\text{откуда следует отношение скоростей} \quad v_c = \frac{v}{v_1} = \frac{l_c}{t_c};$$

$$\text{ускорений} \quad a_c = \frac{a}{a_1} = \frac{l_c}{t_c^2};$$

$$\text{чисел оборотов} \quad n_c = \frac{n}{n_1} = \frac{\omega}{\omega_1} = \omega_c = t_c^{-1};$$

$$\text{работ} \quad A_c = \frac{A}{A_1} = m_c \cdot v_c^2 = m_c \cdot \frac{l_c^2}{t_c^2};$$

$$\text{мощностей} \quad N = \frac{N}{N_1} = \frac{A_c}{t_c} = m_c \cdot \frac{l_c^2}{t_c^3} = m_c \cdot v_c^2 \cdot n_c.$$

При работе одной и той же машины в различном режиме инерционной нагрузки (т. е. когда $\rho_c = l_c = 1$) отношение развиваемых сил $F_c = A_c = n_c^2$ и отношение мощностей $N_c = n_c^3$ пропорционально кубу отношения чисел оборотов ведомого вала. Таким образом, для увеличения скорости одной и той же машины в два раза ее мощность необходимо увеличить в 8 раз. «Часть индикаторной мощности, которая тратится на потери, называется мощностью трения» [7] и составляет 10—15% индикаторной мощности. Мощность трения изменяется пропорционально квадрату числа оборотов коленчатого вала $N_{стр.} = n_c^2$. Различный характер сил сопротивления при движении машины оказывает существенное влияние на динамическое подобие режимов работы. Величина отклонения от динамического подобия показывает степень учета сил сопротивления автомашины. Нетрудно показать, что между автомашинами, входящими в табл. 1, имеет место динамическое подобие. В са-

Таблица 1

Тип автомобилей	Длина l , мм	Вес P_m , кг	Мощность N , л. с.	Число обор. вала n в мин.	Расход бензина q на 100 км пути	Максимальная скорость v , км/час
„Волга“	4055	1460	70	3600	13,5	130
„Москвич“	4830	990	45	3600	6,5	115
„Чайка“	5600	2500	195	3600	15,0	160
ГАЗ-51	5725	$\frac{2710}{2500}$	70	2800	20	70
ЗИЛ-164	6725	$\frac{4100}{4000}$	104	2600	42	65
УАЗ-450	4850	$\frac{1745}{750}$	65	3860	14	90

Примечание: в знаменателе максимальная полезная нагрузка P_2 .

мом деле, принимая автомашину «Волга» за модель, для автомашины «Москвич» получим коэффициенты подобия

$$l_c = \frac{4055}{4830} = 0,84; \quad m_c = \frac{990}{1460} = 0,68; \quad v_c = \frac{115}{130} = 0,885;$$

$$q_c = \frac{6,5}{13,5} = 0,5; \quad N_c = \frac{45}{70} = 0,64; \quad t_c = \frac{0,84}{0,885} = 0,95; \quad n_c = \frac{3600}{3600} = 1,0.$$

Согласно теории подобия

$$N_c = m_c \cdot \frac{l_c^2}{t_c^3} = 0,68 \cdot \frac{0,84^2}{0,95^3} = 0,56; \quad \Delta N_c = \frac{0,64 - 0,56}{0,64} \cdot 100 = 12,5\%.$$

Так как длина автомашины l параметр внешний (непосредственно на работу не влияющий), лучше в данном случае воспользоваться для проверки формулой $N_c = m_c \cdot v_c^2 \cdot n_c$ через данные опыты

$$N_c = 0,68 \cdot 0,885^2 \cdot 1,0 = 0,535; \quad \Delta N_c = \frac{0,11 \cdot 100}{0,64} = 17\%.$$

Тогда можно принять, что $q_c = N_c$ с максимальной погрешностью

$$\frac{N_c - q_c}{N_c} \cdot 100 = \frac{0,64 - 0,5}{0,64} \cdot 100 = 21\%.$$

Для автомашины „Чайка“ коэффициенты подобия

$$l_c = \frac{5600}{4830} = 1,16; \quad m_c = \frac{2500}{1460} = 1,71; \quad v_c = \frac{160}{130} = 1,23;$$

$$q_c = \frac{15}{13,5} = 1,1; \quad N_c = \frac{195}{70} = 2,78; \quad t_c = \frac{1,16}{1,23} = 0,945; \quad n_c = 1.$$

Согласно теории подобия $N_c = m_c \cdot v_c^2 \cdot n_c = 1,71 \cdot 1,23^2 \cdot 1 = 2,58$. Здесь имеется отклонение в значениях N_c по данным опыта и вычислением по теории подобия

$$\Delta N_c = \frac{2,78 - 2,58}{2,78} \cdot 100 = 7,2\%.$$

Расхождение в значениях q_c и N_c (порядка 35 — 60%) объясняются более совершенной системой использования горючего у автомашины „Чайка“. Представляет интерес сопоставление автомобилей легковых марки „Волга“ и грузовых с карбюраторным двигателем. Например, для УАЗ-450 коэффициенты подобия

$$l_c = \frac{4350}{4830} = 0,9; \quad m_c = \frac{1745}{1460} = 1,195; \quad v_c = \frac{90}{130} = 0,69$$

$$q_c = \frac{14}{13,5} \approx 1,0; \quad N_c = \frac{65}{70} = 0,93; \quad n_c = \frac{3860}{3600} = 1,08.$$

По теории подобия $N_c = 1,195 \cdot 0,69^2 \cdot 1,08 = 0,59$; $\Delta N_c = 36,5\%$. Если учесть грузоподъемность УАЗ-450, то по сравнению с предыдущими автомашинами имеет место большее отклонение от геометрического, кинематического и динамического подобия. Здесь $m_c = 1,72$; $N_c = 1,72 \cdot 0,69^2 \cdot 1,08 = 0,85$; $\Delta N_c = 3,6\%$. Для автомашины ГАЗ-51

$$N_c = m_c \cdot v_c^2 \cdot n_c = \frac{5200}{1460} \cdot \left(\frac{70}{130}\right)^2 \cdot \frac{2800}{3600} = 0,82; \quad \Delta N_c = 12\%$$

Для ЗИЛ-164

$$N_c = \frac{104}{70} = 1,48; \quad N_c = \frac{8100}{1460} \cdot \left(\frac{65}{130}\right) \cdot \frac{2600}{3600} = 1,04;$$

$$\Delta N_c = 48\%; \quad q_c = \frac{42}{13,5} = 3,1; \quad q_c \neq N_c.$$

Наконец, рассмотрим подобие между грузовыми машинами ГАЗ-51 и ЗИЛ-164. В качестве модели возьмем ЗИЛ-164, тогда коэффициенты подобия будут иметь значения

$$l_c = \frac{5725}{6725} = 0,85; \quad m_c = \frac{2710}{4100} = 0,65; \quad v_c = \frac{70}{65} = 1,08;$$

$$q_c = \frac{20}{42} = 0,48; \quad N_c = \frac{70}{104} = 0,67; \quad n_c = \frac{2800}{2600} = 1,08;$$

$$N_c = 0,65 \cdot 1,08^2 \cdot 1,08 = 0,82; \quad \Delta N_c = \frac{0,15 \cdot 100}{0,67} = 22,4\%.$$

Значительное отклонение от динамического подобия имеет место и между грузовыми автомашинами ЗИЛ-164 и УАЗ-450. Беря за модель ЗИЛ-164, имеем

$$N_c = \frac{65}{104} = 0,62; \quad q_c = \frac{14}{42} = 0,33;$$

$$N_c = \frac{2495}{8100} \cdot \left(\frac{90}{65}\right)^2 \cdot \frac{3860}{2600} = 0,86; \quad \Delta N_c = 28\%.$$

Здесь, по-видимому, имеет место различное сопротивление движению машин или неточные исходные данные. Так, например, при указанных значениях грузоподъемности, скоростях и числах оборотов $N_c = 0,86$, тогда мощность автомашины УАЗ-450 должна быть $N = 0,86 \cdot N_1 = 0,86 \cdot 104 = 89,3$ л. с., или при заданном значении $N = 65$ л. с. у ЗИЛ-164 достаточна мощность

$$N_1 = \frac{65}{0,86} = 76 \text{ л. с.}$$

Если сохранить действительное значение мощностей, грузоподъемности, чисел оборотов, тогда

$$v_c = \sqrt{\frac{N_c}{m_c \cdot n_c}} = \sqrt{\frac{0,62}{0,31 \cdot 1,46}} = 1,17, \text{ откуда}$$

при скорости ЗИЛ-164 $v_1 = 65$ км/час скорость автомашины УАЗ-450 должна быть $v = 76$ км/час, вместо табличной 90 км/час. Или, наоборот, если скорость $v = 90$ км/час, то скорость v_1 для ЗИЛ-164 должна быть повышена до 77 км/час вместо указанной 65 км/час.

Выбрав в качестве образца автомашину ГАЗ-51, найдем значение мощности N для подобной в динамическом отношении машины при $m_c = 8$; $v_c = 2$; $n_c = t_c = 1$; $l_c = 2$, тогда $N_c = 8 \cdot 2^2 \cdot 1 = 32$; откуда $N = N_c \cdot 70 = 224$ л. с. Нагрузка на детали в новой машине возрастет в

$$F_c = \frac{m_c l_c}{t_c^2} = 8 \cdot 2 \cdot 1 = 16 \text{ раз.}$$

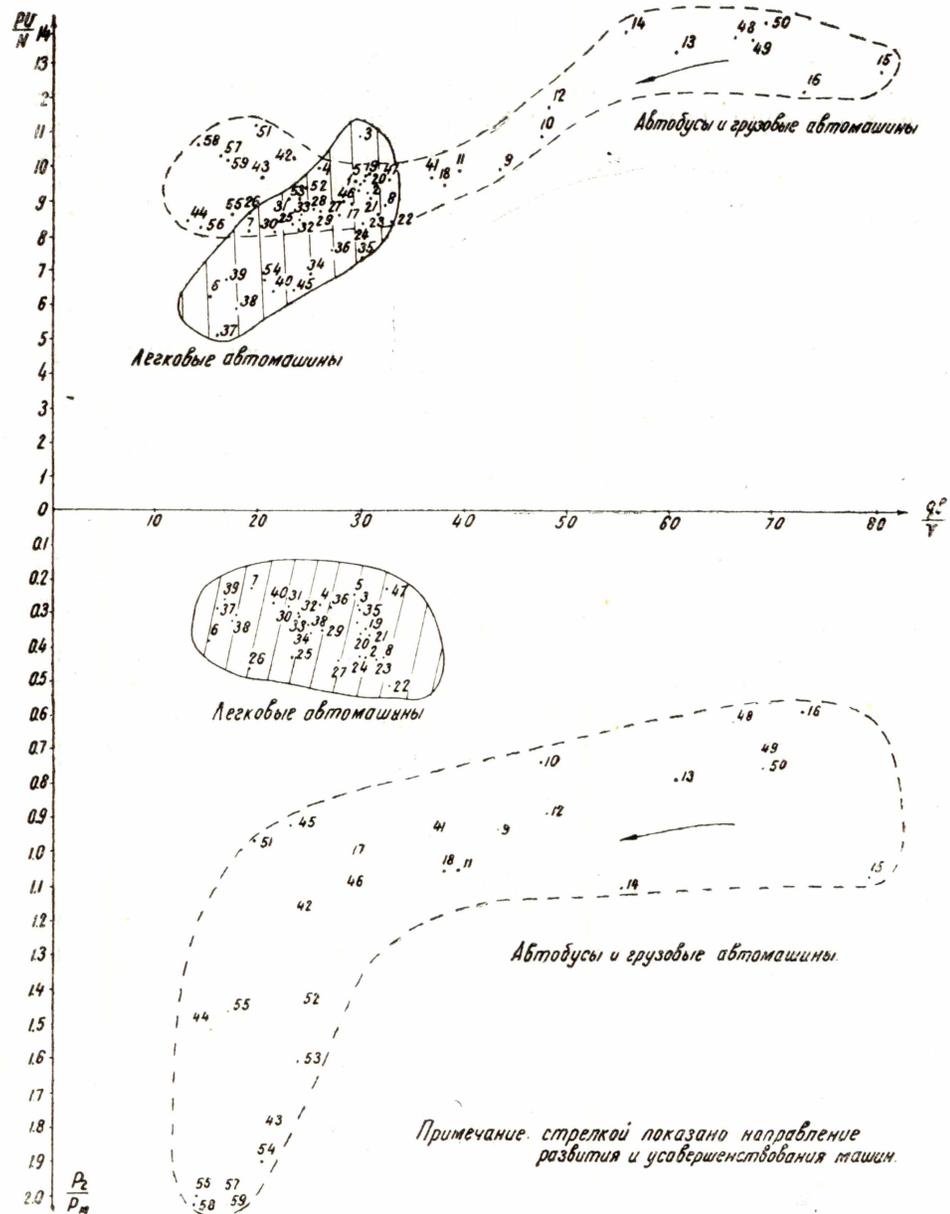
Теория подобия и размерностей дает наглядное представление о направлении конструкторских работ при проектировании автомашин, о выборе их технических и эксплуатационных характеристик. Для сравнения значения основных параметров 59 автомашин (легковые, грузовые, автобусы), по литературным данным [2, 8, 10], представлены на рис. 1 в координатах

$$\frac{P_m \cdot v}{N}; \quad \frac{q \cdot l}{V}; \quad \frac{P_2}{P_m},$$

где P_2 — грузоподъемность, кг;
 v — максимальная скорость движения, м/сек;
 N — минимальная мощность двигателя, кгм/сек;
 q — контрольный расход топлива, см³/м;
 l — длина автомашины, мм;
 V — рабочий объем, см³;
 P_m — вес автомашины в снаряженном состоянии, кг.

Каждая точка в координатах $\frac{P_m \cdot v}{N}; \frac{q \cdot l}{V}$ соответствует одновременно шести величинам (P_m, v, N, q, l, V), а в координатах $\frac{q \cdot l}{V}; \frac{P_2}{P_m}$ ей соответствует отношение грузоподъемности автомашины к ее собственному весу. Для сравнения были выбраны наиболее характерные величины, определяющие эффективность автомашины: мощность, грузоподъемность, скорость движения, размеры, экономичность.

На рис. 1 выделены две области: легковых и легких грузовых автомашин, выполненных на базе легковых (например, точка 8 соот-



Примечание: стрелкой показано направление развития и усовершенствования машин.

Рис. 1.

ветствует машине УАЗ-450). Автобусы фирмы «БОССИНГ» (ФРГ) типа 13U7H более экономичны по сравнению с подобными им отечественными автобусами типа ЗИЛ-158, так как при меньшем расходе горючего на 100 км пробега имеют большую грузоподъемность. С эксплуата-

ционной и экономической точки зрения отечественные и зарубежные легковые автомашины находятся на одном уровне. В современных машинах, особенно грузовых и автобусах, конструкторы идут по пути уменьшения расхода горючего и увеличения грузоподъемности, о чем свидетельствует на рис. 1 кривая в координатах

$$\frac{q \cdot l}{V}; \quad \frac{P_2}{P_M}$$

На рис. 1 и в дальнейшем были введены обозначения.

- | | | |
|-------------------|--------------|----------------------|
| 1 — «Москвич-407» | 14 — МАЗ-200 | 27 — «Джульетта» |
| 2 — ГАЗ-69 | 15 — ЯАЗ-219 | 28 — «Консул» |
| 3 — «Победа» | 16 — ЯАЗ-214 | 29 — «Энсайн» |
| 4 — «Волга» | 17 — МАЗ-525 | 30 — «Опель-капитан» |
| 5 — ГАЗ-12 | 18 — МАЗ-530 | 31 — БМВ — 2,6 |

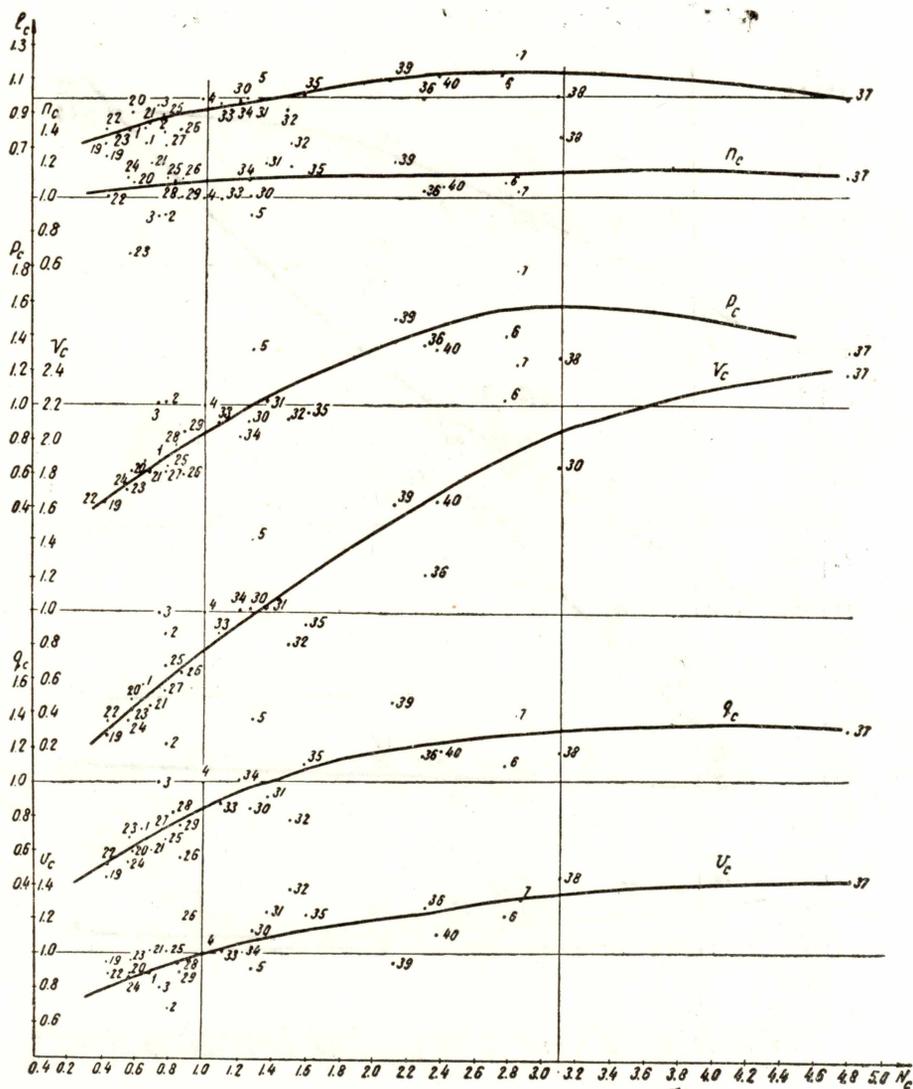


Рис. 2.

- | | | |
|-------------|-------------------|-------------------------|
| 6 — «Чайка» | 19 — БМВ-700 | 32 — «Альфа Ромео-2000» |
| 7 — ЗИЛ-111 | 20 — «Опель-1200» | 33 — «Фрегат» |
| 8 — УАЗ-450 | 21 — «Аппиа-111» | 34 — «Зефир» |

- | | | |
|----------------------|--------------------|-------------------------|
| 9 — ГАЗ-51 | 22 — «Дофип» | 35 — «Ягуар-2,4 станд.» |
| 10 — ГАЗ-63 | 23 — «Англия» | 36 — «Мерседес-300Л» |
| 11 — «Урал-Зис-355М» | 24 — «Геральд» | 37 — Фасел Вега |
| 12 — ЗИЛ-164 | 25 — «Рекорд-1700» | «Экселланс» |

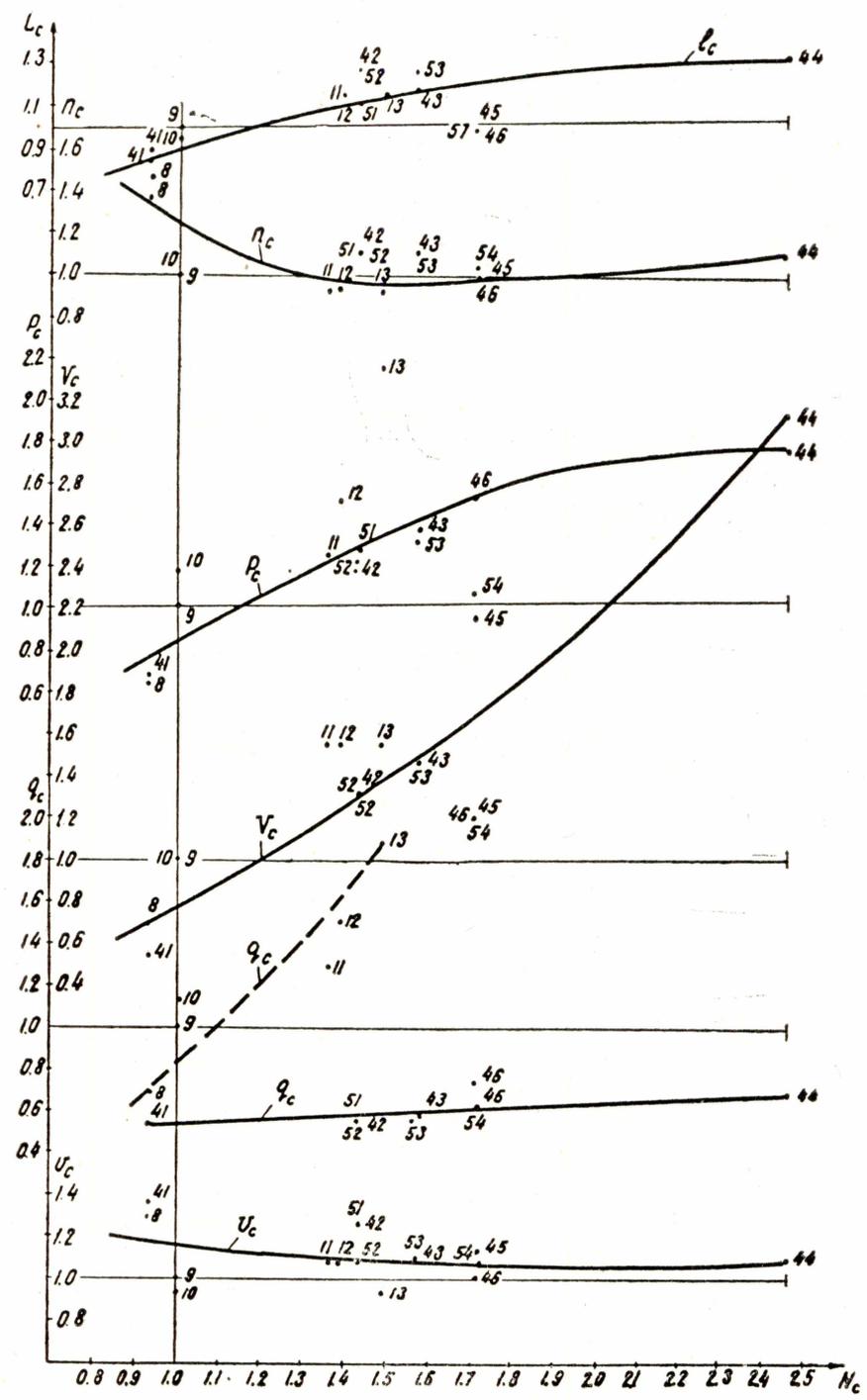


Рис. 3.

- | | | |
|-----------------------|-----------------|-------------------|
| 13 — ЗИЛ-157 | 26 — 356 В/1600 | 54 — FK4500 тягач |
| 38 — «Майор» | 46 — FK 4500 | 55 — 12R/U54 |
| 39 — «Остин Принцесс» | 47 — УАЗ-450В | 56 — 13U7H |
| 40 — «Санфайр» | 48 — ПАЗ-652 | 57 — 13R/U10 |

41 — L 319
42 — L 311
43 — L 322
44 — L 337
45 — FK 3500LBAC

49 — ЛАЗ-695Б
50 — ЗИЛ-158
51 — L K311
52 — L 312
53 — 321

58 — TU10
59 — 14R/U10

На рис. 2 представлены кривые в относительных единицах

$N_c; q_c; V_c; P_c; n_c; v_c$.

За образец (эталон сравнения) была взята широко распространенная автомашина «Волга».

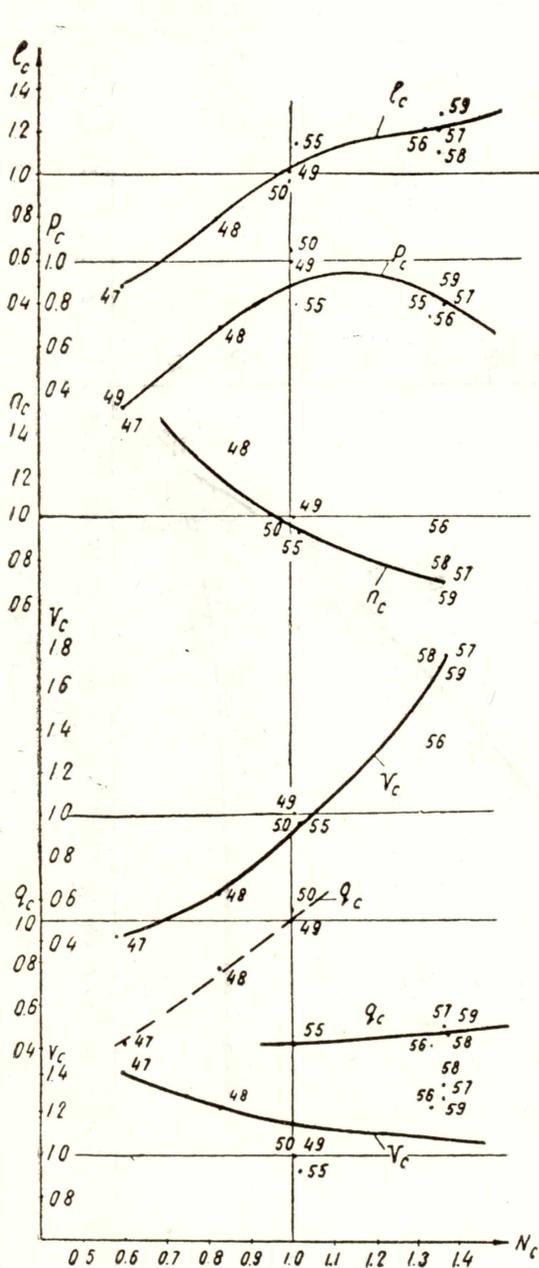


Рис. 4.

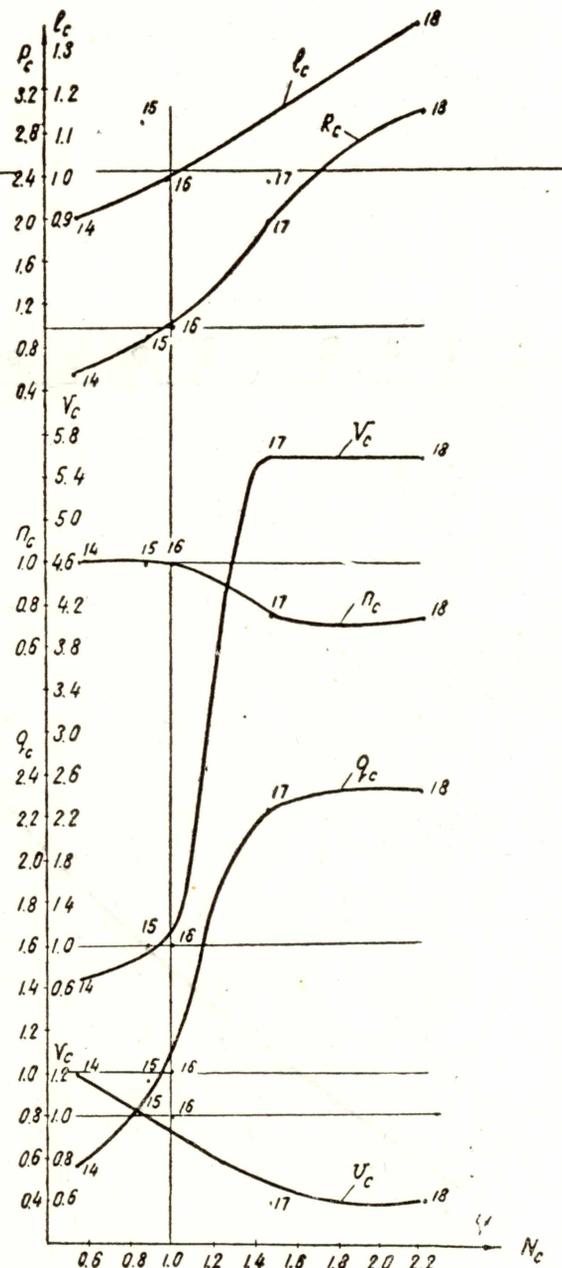


Рис. 5.

Кривые на рис. 2 показывают, что с увеличением мощности двигателя увеличиваются v, q, V, P_m . Число оборотов коленчатого вала n с увеличением N остается почти неизменным. Увеличение веса автома-

шин по сравнению с «Волгой» идет интенсивно до величины 1,6, а дальше прекращается. Вес «тяжелых» легковых машин остается почти неизменным. Скорость движения с увеличением N возрастает незначительно, но при этом резко растет рабочий объем V двигателя (литраж).

На рис. 3 изображены кривые в относительных единицах для грузовых автомашин с карбюратором двигателя. За эталон сравнения была принята ГАЗ-51. Для грузовых автомашин с увеличением N , v и p уменьшаются, но резко возрастает V . По расходу горючего на 100 км пробега грузовые машины разделились на две группы: а) отечественные, б) зарубежные. Для зарубежных машин с увеличением N q возрастает незначительно, чего нельзя сказать об отечественных автомобилях.

На рис. 4 представлены кривые в относительных единицах для автобусов, которые сравнивались с ЛАЗ-695Б. Характер кривых на рис. 4 аналогичен кривым рис. 3, так как многие автобусы имеют двигатель грузовой автомашины.

На рис. 5 изображены кривые для автомашин с дизельным двигателем, которые сравнивались с ЯАЗ-214. Для дизельных машин увеличение N уменьшает v , n , но при этом резко возрастает P_e , q , V .

На рис. 6 представлены кривые в координатах q , N и безразмерного комплекса величин $\frac{P_m \cdot v}{N}$. Здесь выделились две области: грузовых и легковых автомашин. Для легковых увеличение N незначительно повышает q , а для грузовых q возрастает резко. На рис. 6 в координатах q ; $\frac{P_m \cdot v}{N}$ также выделилось две области: грузовых и легковых машин.

Заключение

Динамическое подобие имеет место для автомашин, построенных по одной и той же конструктивной схеме. Методы теории подобия и размерностей можно с успехом применять к выбору и расчету основных параметров автомашин, а также исследованию режимов движения и возникающих нагрузок на детали. В случае отсутствия динамического подобия между автомашинами, построенными по различному принципу, в безразмерных координатах можно охватить области параметров действующих машин и направление исторического развития в их конструировании. Так, например, из рис. 1 видно:

а) область параметров легковых машин весьма ограничена, стабилизировалась во времени, что указывает на приближение конструкторов к некоторому пределу возможностей выбора более оптимальных параметров автомашин, работающих на известных принципах. Для создания нового качества автомашин нужны новые принципы;

б) у автобусов и грузовых машин имеется тенденция (исторически во времени) в направлении повышения грузоподъемности, увеличения рабочего объема (литража) и уменьшения расхода горючего.

Наибольшей наглядностью и универсальностью обладают графики, построенные в относительных координатах.

Изложенная нами методика может быть распространена на различные виды транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. М. Алабужев. Применение теории подобия и размерностей к исследованию (моделированию) машин ударного действия. Известия ТПИ, т. 73, Томск, 1952.
2. В. И. Анохин. Отечественные автомобили, Машгиз, 1961.
3. Г. А. Барсов, Л. Б. Безменов, Л. Г. Грозденская, А. В. Жилиговская, Г. А. Кувшинников, И. О. Кульбачевский, С. И. Пантеле-

- ев, Ж. И. Жехвец, В. В. Юденич. Теория плоских механизмов и динамика машин. Известия Высшей школы, Москва, 1961.
4. В. А. Веников. Вопросы моделирования и теория подобия, ж. «Вестник высшей школы» № 2, Известия Высшей школы, Москва, 1963.
 5. В. Л. Крипичев. Беседы о механике. ГИТТЛ, М.—Л., 1957.
 6. М. В. Кирпичев. Теория подобия, АН СССР, Москва, 1953.
 7. А. В. Максай, Н. И. Полянский. Теория авиационных двигателей. Воен. изд. ВМ СССР, Москва, 1950.
 8. И. П. Плеханов, В. А. Чернякин, С. В. Пампель. Справочник шофера. Автотрансиздат, 1956.
 9. А. В. Резняков. Краткий справочник по теории подобия. Изд. АН Каз. ССР, Алма-Ата, 1950.
 10. Г. И. Самаль. Зарубежные автомобили. Труды НАМИ, 1960.
 11. Л. И. Седов. Методы теории подобия и размерностей в механике. ГИТТЛ Москва, 1957.
 12. Сб. «Теория подобия и моделирования». Изд. АН СССР, Москва, 1951.
-