

УДК 621.43

DOI: 10.31388/2078-0877-19-4-149-176

## РАСЧЁТ НОМИНАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМ СМАЗКИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИМИ КРИТЕРИЯМИ ПОДОБИЯ

Стефановский А. Б., к.т.н.,

Болтянский О. В., к.т.н.

*Таврический государственный агротехнологический университет  
имени Дмитрия Моторного*

Тел. (0619) 42-04-42

**Аннотация** – в статье обобщены опубликованные сведения о параметрах и показателях шестерённых масляных насосов с внешним зацеплением, применявшихся и применяющихся в отечественных автомобильных двигателях с искровым зажиганием. Выражения для критериев подобия Рейнольдса, Эйлера и Струхала, используемых в гидродинамике и исследованиях гидроприводов, модифицированы так, чтобы в них входили основные параметры этих насосов. На основании гипотезы об однородности физического состояния сходных по составу моторных масел при нормальном тепловом режиме автомобильных двигателей, вместо самих критериев Рейнольдса и Эйлера рассмотрено изменение их размерных аналогов, не зависящих от свойств масел. В качестве определяющего размера выбрано «среднее геометрическое» осевой длины и наружного диаметра шестерён насоса. Получен ряд обобщённых зависимостей между указанными критериями, с той или иной точностью характеризующих различные совокупности исследованных масляных насосов. Разработаны способы расчёта номинальной подачи масла и его избыточного давления с использованием этих зависимостей, из этих способов выбраны наиболее удачные. Средняя по абсолютной величине относительная погрешность (САОП) расчёта подачи масла изменяется от 0,010 до 0,156 (при изменении соответствующего количества насосов от 7 до 11), а для наиболее общих зависимостей, характеризующих 22...26 насосов, находится в пределах 0,10...0,15. САОП расчёта давления масла изменяется от 0,071 до 0,137 (при изменении соответствующего количества насосов от 11 до 26). Для использования некоторых обобщённых зависимостей предложены дополнительные соотношения параметров, улучшающие сходимость итераций и снижающие относительную погрешность результатов расчёта подачи масла. Большинство полученных обобщённых

зависимостей пригодны для расчёта подачи и давления масла в системах смазки современных автомобильных двигателей со впрыском бензина (ЗМЗ-409, УМЗ-4213). Для этих двигателей сопоставлена точность результатов, получаемых с помощью разных зависимостей, и сделаны рекомендации об их выборе.

**Ключевые слова** - двигатель, система смазки, подача масла, давление масла, зависимость.

*Постановка проблемы.* Известен [1; 2] метод расчёта подачи масла шестерённым насосом системы смазки автомобильного поршневого двигателя (далее АПД). Данный метод позволяет вычислить эту подачу в зависимости от размеров шестерён насоса и их частоты вращения для конкретных условий применения в АПД. При этом нужно задаваться значениями ряда параметров, изменяющихся довольно широко: коэффициентом подачи насоса, окружной скоростью выступов зубьев, их количеством, модулем зацепления. В этих источниках информации нет расчётного обоснования избыточного давления масла в системе смазки, которое предлагается просто выбрать из довольно широкого интервала 0,3...0,5 МПа. Изложенный выше метод, следовательно, даже для одного и того же двигателя может давать значения подачи масла, находящиеся в широком интервале. Поэтому инженеру-конструктору из всех возможных комбинаций независимых переменных, влияющих на подачу масла насосом, сложно выбрать наиболее рациональную. Так, если стремиться к снижению затрат работы на привод масляного насоса, то следует снижать и давление, и подачу масла, но это может ухудшить надёжность АПД. И выбранная комбинация значений параметров, приводящая к вычислению конкретного значения подачи масла в системе смазки данного АПД, и получаемый результат могут произвольно отличаться от них для другого двигателя.

*Анализ последних исследований.* Выше кратко указаны недостатки известного метода расчёта подачи масла насосом системы смазки [1 – 3]. В работах [3; 4] вместо давления масла в системе смазки говорится только о перепаде давления, создаваемом насосом. Хотя избыточное давление масла и этот перепад имеют одинаковый порядок величины, они в общем случае не совпадают. Для работы АПД более важна именно величина давления очищенного масла перед его подачей основным потребителям - подшипникам скольжения.

*Формулирование цели статьи:* установить количественные соотношения между значениями номинальных параметров систем смазки (подачи и давления масла) отечественных АПД с искровым зажиганием с использованием критериев подобия, применяемых в

гидродинамике.

*Основная часть.* Так как дизельные двигатели будут рассмотрены в другой статье, далее АПД считаются "по умолчанию" имеющими искровое зажигание. Рассмотрены только отечественные АПД, оснащённые шестерёнными масляными насосами с внешним зацеплением, приводимыми от коленчатых валов двигателей через зубчатые передачи. Для двухсекционных шестерённых насосов в данном исследовании рассматривались только основные, более производительные секции, хотя, в принципе, можно было бы аналогичным образом рассмотреть и радиаторные их секции. Вначале рассмотрен ряд терминов, применяющихся далее, а также принятые допущения.

Номинальными считаются параметры, реализованные при работе АПД с полной нагрузкой и указанные в технической характеристике двигателя, например в тексте руководства по эксплуатации. Однако в характеристиках и описаниях отечественных АПД, как правило, не указывалась номинальная подача масла, а избыточное давление масла указывалось как контрольный параметр, и часто не при номинальной частоте вращения, а при более низкой.

В связи с этим, сведения о номинальной подаче масла насосами этих АПД были взяты, в основном, из справочника Гугина А.М. [5]. Также эта подача была указана в описании автомобиля ЗАЗ-965А "Запорожец" [6] и более подробно рассмотрена Бабкиным Г.Ф. и др. [7] для двигателя автомобиля ЗИЛ-130. Анализ значений подачи масла, приведенных А.М. Гугиным, показал, что во многих случаях они соответствуют неправдоподобным величинам коэффициента подачи соответствующих насосов, выходящим за рамки часто рекомендуемого интервала этого параметра 0,6...0,8 [1, 2, 8]. Так как К.Л. Навроцкий считал, что этот коэффициент (объёмный коэффициент полезного действия) у шестерённых насосов может достигать даже 0,97 [9], в данном исследовании интервал допустимых значений коэффициента подачи масляного насоса был расширен. Все опубликованные значения подачи, для которых данный коэффициент выходил из интервала 0,60...0,95, считались искажёнными (неважно, почему) и были скорректированы так, чтобы коэффициент подачи вписался в этот интервал. Методика такой коррекции учитывала влияние параметров конструкции насоса на величину коэффициента подачи и здесь не изложена; она позволила распространить исследование на двигатель автомобиля "Москвич-412" и более современные АПД, разработанные после 1967 г. Заволжским, Мелитопольским и Ульяновским моторными заводами (ЗМЗ, МеМЗ, УМЗ), а также на Волжском и Горьковском автозаводах (ВАЗ, ГАЗ).

Значения давления масла, приведенные А.М. Гугиным [5],

соответствовали открытию редукционных клапанов масляных насосов. Значения этого давления, приведенные в описаниях отечественных АПД, обычно соответствовали показанию манометра в месте контроля при некоторой частоте вращения коленчатого вала двигателя, обычно меньшей номинальной частоты его вращения. Это привело к неоднородности информации о давлении масла в системах смазки АПД, которой, в связи с гораздо меньшей изменчивостью давления по сравнению с изменчивостью подачи масла, пришлось пренебречь. Указанные значения часто давались в форме интервала допустимого давления масла; для этих случаев обобщены сведения о верхних пределах давления масла при нормальном тепловом режиме соответствующих двигателей.

Сопоставление значений частоты вращения валиков масляных насосов и номинальной частоты вращения коленчатых валов соответствующих АПД [5] показало, что они практически всегда соотносятся, как 1:2. Исключениями здесь были двигатели автомобильный ЗИЛ-111 и стационарные семейств УД и УНД, но, как выяснилось, это было вызвано ошибками в опубликованных значениях ряда размеров и частоты вращения валиков насосов (заниженной у ЗИЛ-111 и завышенной у стационарных двигателей). Это позволило считать практически достоверным, что номинальная частота вращения валика масляного насоса  $n_{\text{нас}}$  с внешним зацеплением шестерён вдвое ниже, чем у коленчатого вала АПД, и потому не является «свободным» параметром. Поэтому для более новых (чем описанные А.М. Гугиным) АПД данное правило и применялось для определения неопубликованной номинальной частоты вращения валика насоса. В то же время, у модификаций базовой модели АПД, у которых номинальная частота вращения коленчатого вала  $n_n$  различалась незначительно, влиянием соответствующего различия  $n_{\text{нас}}$  на подачу масла пренебрегалось: например, для карбюраторных двигателей ВАЗ с номинальной частотой вращения 5200...5600 1/мин.

В гидродинамике и исследованиях гидравлических машин и приводов применяются безразмерные комплексы переменных – критерии подобия Рейнольдса, Эйлера и Струхала (обозначения соответственно  $Re$ ,  $Eu$ ,  $Sh$ ) [10]. Выражения для их вычисления были не вполне удобны для цели данного исследования и были несколько изменены с помощью соображений, основанных на анализе размерностей и применяемых единиц измерения параметров и показателей масляных насосов. При этом выяснилось, что критерии  $Re$  и  $Eu$  можно вычислять тремя и двумя вариантами, соответственно, так как по-разному можно находить определяющую скорость потока  $v$ : через избыточное давление масла  $\Delta p_m$ , как отношение подачи масла  $Q_{\text{нас}}$  к характерной площади поперечного сечения (квадрату определяющего

размера) и даже как произведение  $1/60$  частоты вращения валика насоса  $n_{\text{нас}}$  на размер этого сечения. Критерий Струхала вычислялся только одним способом – как отношение объёма, существенного для конструкции насоса (куба определяющего размера), к произведению подачи масла  $Q_{\text{нас}}$  и характерного интервала времени, принятого равным  $60/n_{\text{нас}}$  – продолжительности (в секундах) одного оборота валика насоса. Выбор форм выражений для вычисления критериев  $Re$  и  $Eu$  далее осуществлялся на основе качественных и количественных показателей выявляемых зависимостей между этими критериями, а также между ними и критерием Струхала.

Как известно, критерии  $Re$  и  $Eu$  вычисляются с использованием значений плотности и кинематической вязкости жидкости. В данном исследовании принято, что АПД находятся в нормальном тепловом режиме, характеризующемся однородностью температуры моторного масла. Последняя должна как в месте контроля, так и в насосе находиться в пределах  $75...90^{\circ}\text{C}$  (ближе к  $90^{\circ}\text{C}$  при воздушном охлаждении) [8; 11]. А так как у всех рассмотренных АПД применялись и применяются сходные по составу и физическим свойствам моторные масла (летние или всесезонные при температуре окружающего воздуха  $20...25^{\circ}\text{C}$ , при которой определены номинальные показатели двигателей), то различиями значений их плотности и кинематической вязкости при указанных температурах можно пренебречь. Это позволяет вместо вычисления критериев  $Re$  и  $Eu$  ограничиться вычислением их размерных аналогов ( $Re$ ) и ( $Eu$ ), в выражения для которых не входят плотность и кинематическая вязкость масла. Этот приём также позволяет использовать практически удобные единицы измерения подачи масла (литры в минуту), давления (мегапаскалы) и характерного размера (миллиметры). В качестве последнего было выбрано "среднее геометрическое" ширины (осевой длины)  $b_{\text{ш}}$  и наружного диаметра  $d_{\text{нар,ш}}$  шестерни насоса, то есть квадратный корень из их произведения, так как подача масла зависит от обоих этих параметров; далее для краткости буква «ш» в их обозначениях опущена. Так как этот определяющий размер влияет на исследуемый процесс – подачу масла, то можно получить обобщённые зависимости даже для геометрически не подобных шестерённых насосов АПД [12]. Для рассмотренной совокупности их, данный размер изменяется от 29,5 до 46,3 мм – примерно в полтора раза.

У подавляющего большинства рассмотренных шестерённых насосов применялись прямозубые шестерни с количеством зубьев  $z_{\text{зуб}}=7$ . Исключениями были насосы: стационарных двигателей УД и УНД ( $z_{\text{зуб}}=12$  или  $14$ ); АПД ВАЗ ( $z_{\text{зуб}}=9$ , косозубые), ЗИС-110 ( $z_{\text{зуб}}=15$ ) и Урал-5М ( $z_{\text{зуб}}=10$ ). На иллюстрациях далее показано стрелками смещение точек, соответствующих насосам с  $z_{\text{зуб}} \neq 7$ , при задании

различных значений ненулевого показателя степени  $b_z$ : на  $(z_{зуб}/7)^{-b_z}$  умножался определяющий размер такого насоса. Как будет видно, учёт отличия  $z_{зуб}$  от 7 почти не улучшает вида зависимостей, и потому, учитывая также малочисленность разработанных конструкций масляных насосов АПД с  $z_{зуб} \neq 7$ , влиянием этого отличия на полученные зависимости обычно пренебрегается.

Таким образом, аналоги критериев  $Re$  и  $Eu$ , а также критерий Струхала в данном исследовании вычислялись по следующим формулам:

- аналоги критерия Рейнольдса

$$(Re_I) = (\Delta p_m b d_{нар})^{0,5}; (Re_{II}) = Q_{нас}(b d_{нар})^{-0,5}; (Re_{III}) = n_{нас} b d_{нар}/60; \quad (1 - 3)$$

- аналоги критерия Эйлера (кроме  $Eu_I = 0,5$ )

$$(Eu_{II}) = \Delta p_m (b d_{нар}/Q_{нас})^2; (Eu_{III}) = 10^{12} \Delta p_m n_{нас}^{-2}/(b d_{нар}); \quad (4; 5)$$

- критерий Струхала

$$Sh = 10^{-6} (b d_{нар})^{1,5} (n/Q)_{нас}. \quad (6)$$

Единицы измерения этих переменных следующие: аналогов  $Re$  соответственно  $1 \text{ Н}^{0,5} = 1 \text{ (кг*м)}^{0,5}/\text{с}$ ,  $1 \text{ л}/(\text{мин*мм})$ ,  $1 \text{ мм}^2/\text{с}$ ; обоих аналогов  $Eu$   $1 \text{ (кг/м}^3)(\text{мин/с})^2$ . Единицы измерения параметров, входящих в эти формулы, пояснены ранее.

Значения аналогов критериев  $Re$  и  $Eu$ , критерия  $Sh$  для 26 масляных насосов отечественных АПД, а также стационарных двигателей УД1 и УД2 приведены в табл. 1. В ряде случаев (АПД ГАЗ-13, ГАЗ-66 и ЗМЗ-53; М-21 и УМЗ-451М; ЗИЛ-130 и ЗИЛ-375; МеМЗ-965 и МеМЗ-966А) применялись практически одинаковые насосы при несовпадении части параметров, влиявших на величины критериев. Для двигателей автомобилей «Москвич-407» и «Москвич-408», вследствие неоднозначности исходных параметров (размеров шестерён, опубликованных в различных источниках, и подачи масла), приведены интервалы значений критериев, откуда были получены средние их значения при обосновании числовых параметров рассматриваемых далее зависимостей. Значения для устаревших двигателей ЗИС-110 и Урал-5М, разработанных в середине XX века, использованы потому, что, во-первых, в соответствии с [5], у их масляных насосов получились значения коэффициента подачи, находившиеся в принятом выше интервале, и, во-вторых, эти насосы по размерам шестерён существенно отличались от позже разработанных.

Примечания: (1) звёздочкой \* обозначены АПД со впрыском бензина («инжекторные»); (2) левая и правая границы интервалов значений для АПД МЗМА-407 и 408 соответствуют меньшему и большему возможному значению подачи масла.

Таблица 1 – Значения аналогов критериев подобия и критерия Струхала

для шестерённих масляних насосов с внешним зацеплением при номинальных параметрах

Модель двигателя	Аналоги критерия Re			Аналоги критерия Eu		Критерий Sh
	(Re <sub>I</sub> )	(Re <sub>II</sub> )	10 <sup>-3</sup> (Re <sub>III</sub> )	(Eu <sub>II</sub> )	(Eu <sub>III</sub> )	
1	2	3	4	5	6	7
Стационарные УД1, УД2	10,14	0,176	7,46	3323	514,3	2,536
Автомобильные ВАЗ: 2101, 2103	21,4	1,185	47,5	326,5	56,38	2,40
2106	21,4	1,185	45,8	326,5	60,63	2,34
21213	21,4	1,185	44,1	326,5	65,39	2,28
ГАЗ: 13	23,2	1,45	44,94	256,1	74,18	1,86
14	27,3	1,187	53,2	528,1	73,10	2,69
66	23,2	0,991	32,7	548,8	140,25	1,98
М-21, ЗМЗ-21А	21,0	0,819	37,8	658,4	85,98	2,76
ЗМЗ: 24Д, 2401	21,3	0,860	42,6	613,2	69,58	2,966
53, 66	21,7	1,00	32,1	469,5	126,5	1,93
511.10	22,0	0,9525	34,1	534,1	116,1	2,144
409*	23,3	1,173	44,1	392,8	77,32	2,256
ЗИЛ: 111	24,9	1,728	74,9	207,5	30,73	2,60
130	23,3	1,20	42,64	377,3	83,06	2,13
375	25,0	1,20	42,64	432,8	94,71	2,13
МеМЗ: 965	18,4	0,719	29,0	656,8	112,1	2,415
966А	22,5	0,712	29,0	995,5	166,7	2,444
968	19,74	1,114	41,1	315,0	64,18	2,215
МЗМА-407: (1)	15,74	0,926...1,018	27,3	288...238	92,31	1,77...1,607
(2)	16,74	0,871...0,958	31,0	371...306,4	81,35	2,14...1,942
МЗМА-408: (1)	20,8	1,146...1,224	34,3	331...290	102,2	1,80...1,69
(2)	21,4	1,116...1,192	36,2	368...322,4	96,97	1,95...1,826
412	24,0	1,070	47,1	502,8	71,95	2,64
УМЗ-451М	21,1	0,817	38,03	666,5	85,45	2,79
417	21,75	1,150	48,8	358,9	55,315	2,55
4218, 421, 4213*	21,63	1,102	45,94	386,1	61,67	2,50
ЗИС/ЗИЛ-110	21,63	0,957	46,8	510,9	59,36	2,93
Урал-5М	23,8	0,347	25,13	4697	248,7	4,36

Включение данных по насосам АПД ЗИС-110 и Урал-5М, а также стационарных двигателей УД позволило получить более общие зависимости (однако для УД  $n_{\text{нас}} \approx 0,7n_n$ ). В то же время, насосы разработанных тогда же АПД «Москвич-400», М-20, ГАЗ-51 и ГАЗ-12 «ЗИМ» не включены в базу данных исследования, так как, с одной стороны, на основе данных [5] они не имели нормальных величин коэффициента подачи, а с другой – они были по конструкции однотипны с масляными насосами более новых АПД, включённых в базу данных. По первой из этих причин не рассматривался и масляный насос АПД ЗИЛ-120, сходный с насосом двигателя Урал-5М.

Кратко охарактеризуем изменчивость аналогов критериев подобия Re и Eu и критерия Sh на основе информации об их значениях (табл. 1). Если не рассматривать насос стационарных двигателей УД, то для масляных насосов отечественных АПД наименее изменчивы (Re<sub>I</sub>) и

Sh, а наиболее –  $(Re_{II})$  и  $(Eu_{II})$ .

Прежде чем рассматривать зависимости, полученные между аналогами критериев подобия, а также между ними и критерием Sh, целесообразно пояснить, как их можно использовать для расчёта номинальных подачи и давления масла. Обозначим зависимую переменную буквой Y, а независимую – буквой X, причём ими являются любые не совпадающие правые части формул (1 – 6). Пусть искомая величина входит в такую правую часть, определяющую зависимую переменную Y. Тогда для расчёта подачи масла  $Q_{нас}$  (л/мин) получатся выражения, перечисленные в фигурных скобках и соответствующие формулам (2, 4, 6):

$$Q_{нас} = \{(Re_{II})(bd_{нар})^{0,5}; (\Delta p_m / (Eu_{II}))^{0,5} bd_{нар}; 10^{-6} (bd_{нар})^{1,5} (n_{нас} / Sh)\}. (7 - 9)$$

Для расчёта давления масла  $\Delta p_m$  (МПа) получатся выражения, соответствующие формулам (1, 4, 5):

$$\Delta p_m = \{(Re_I)^2 / (bd_{нар}); (Eu_{II})(Q_{нас} / (bd_{нар}))^2; 10^{-12} (Eu_{III}) n_{нас}^2 bd_{нар}\}. (10 - 12)$$

В полученные формулы вместо аналогов критериев Re и Eu и критерия Sh нужно подставлять правые части выражений их зависимостей от независимых переменных X. Видно, что трудность вычислений  $Q_{нас}$  и  $\Delta p_m$  с помощью приведенных формул неодинакова и может существенно зависеть от вида правой части обобщённой зависимости Y(X). Формула (11) также неудобна тем, что давление масла вычисляется на основе известного значения подачи масла, тогда как измерить  $\Delta p_m$  намного проще, чем  $Q_{нас}$ . Наибольшей чувствительности результата к размерам шестерни насоса b и  $d_{нар}$  можно ожидать для формул (9) и (11), а к частоте вращения  $n_{нас}$  – для формулы (12). В целом видно, что и подача масла, и давление могут быть вычислены несколькими способами, с различными трудоёмкостью и точностью. Оптимальный способ – тот, в котором приемлемая точность достигается при разумной трудоёмкости.

Поскольку важнее разработать метод расчёта подачи масла, гораздо более вариабельной, чем его давление, то в качестве зависимой переменной Y выбирались, прежде всего, те из критериев подобия и их аналогов (1 – 6), в выражения для которых входит  $Q_{нас}$ . Поэтому были построены и исследованы графики следующих зависимостей:  $(Re_{II})$  от  $(Re_I)$  и  $(Re_{III})$ ;  $(Eu_{II})$  от  $(Eu_{III})$  и  $(Re_{II})$ ; Sh от  $(Re_{II})$ ,  $(Re_{III})$ ,  $(Eu_{II})$  и  $(Eu_{III})$ . Дополнительно были исследованы графики зависимостей  $(Re_I)$  от  $(Re_{III})$  и  $(Eu_{III})$  от  $(Re_I)$ , позволяющих вычислить давление масла.

На рис. 1 показаны зависимости  $(Re_{II})$  от  $(Re_I)$  и  $(Re_{III})$ , а на рис. 2 – зависимости  $(Re_I)$  от  $(Re_{III})$ . На рис. 3 и 4 показаны зависимости  $(Eu_{II})$  от  $(Eu_{III})$  и  $(Re_{II})$ , а также  $(Eu_{III})$  от  $(Re_I)$ . На рис. 5 и 6 показаны графики зависимостей критерия Струхала от аналогов критериев Re и Eu. В ряде случаев совмещены по осям ординат в одно изображение два графика, имеющие одну и ту же ось ординат. На всех графиках приняты

следующие обозначения точек, соответствующих конкретным масляным насосам:  $x$  – насос карбюраторного двигателя;  $ж$  – насос «инжекторного» двигателя (с жидкостным охлаждением в этих случаях);  $ю$  – насос двигателя УД или МеМЗ с воздушным охлаждением (ВО). Штриховые линии без коротких штрихов, обозначенные цифрой 1, проведены, как правило, через наиболее крупные совокупности точек, которые можно было математически описать. Через другие совокупности точек проведены штриховые линии с различным числом коротких штрихов, обозначенные номерами 2, 3 и т.д. Как правило, одна из таких линий характеризует масляные насосы двигателей с воздушным охлаждением.

Основой для синтеза математических описаний-моделей, соответствующих изображённым на рис. 1 – 6 линиям, служил реализованный на персональном компьютере метод наименьших квадратов (МНК). Точность предлагаемых МНК таких моделей (линейных или квадратичных функций исходных или преобразованных координат) оценивалась путём сопоставления исходных и расчётных (согласно синтезированной модели) значений зависимых переменных. Числовые параметры этих моделей – коэффициенты полиномов дополнительно корректировались, чтобы сблизить величины предельных (с минусом и плюсом) относительных погрешностей для наименее точно охарактеризованных точек исследованной их совокупности и округлить до двух-четырёх значащих цифр значения полученных коэффициентов.

Точность полученных обобщённых зависимостей, а также рассчитанных на их базе значений подачи и давления масла оценивалась следующими параметрами: среднеквадратичным отклонением (СКО)  $\sigma(\{Y_j\}, j=1,2,\dots,z_{\text{точ}})$ ; относительным СКО, равным отношению СКО  $\sigma$  к среднему арифметическому исходных значений  $\{Y_j\}$ ; средней по абсолютной величине относительной погрешностью (САОП) результата  $|R\{Y_j\}|_{\text{ср}}$ ; пределами относительной погрешности (ОП) результата, имеющими знак. СКО вычислялось, как общепринято в математической статистике, для количества точек совокупности, уменьшенного на единицу [13], и потому относительное СКО могло быть выше, чем САОП. (Такой способ подсчёта СКО был бы оправдан при наличии неопределённо большой «генеральной совокупности» масляных насосов, из которой взяты для исследования перечисленные в табл. 1. Но на самом деле общее количество моделей шестерённых насосов с внешним зацеплением, применявшихся и применяющихся в отечественных АПД, лишь немного превышает 30. Поэтому вычисление значений СКО в данном исследовании – не более чем дань традиции.)

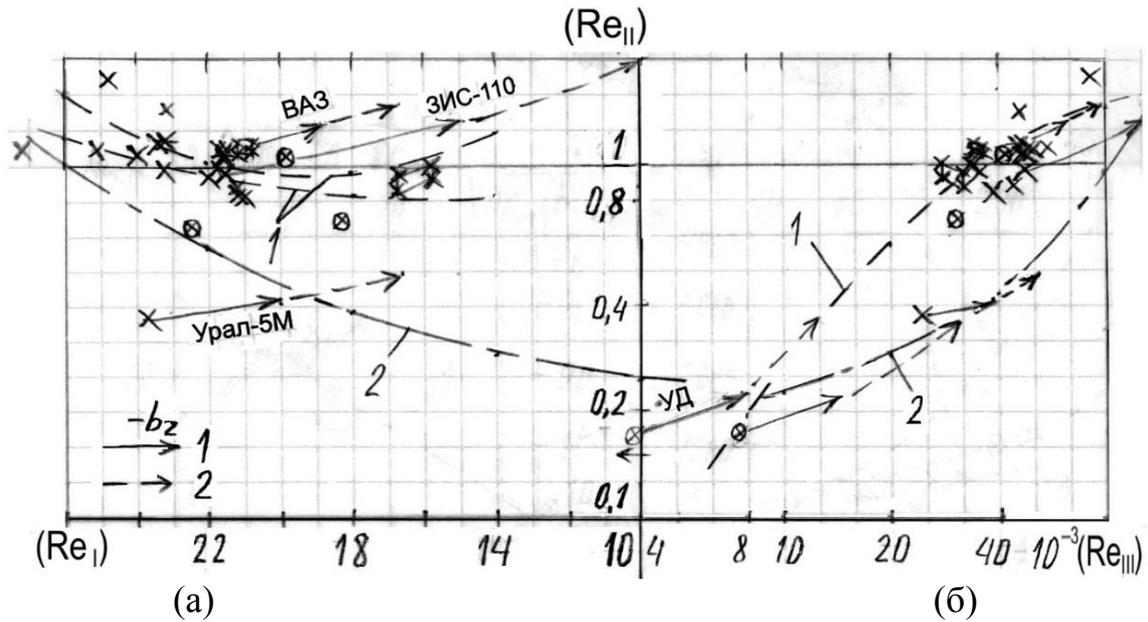


Рис. 1. Зависимости между различными аналогами критерия Рейнольдса: 1 - линии для совокупности большинства точек; 2 - линии для "выпавших" точек, в том числе (а) для насосов АПД ГАЗ-14 и МеМЗ-966А. Стрелками здесь и далее показаны положения некоторых точек при учёте отличия количества зубьев шестерён насоса от семи ( $b_z$  - отрицательный показатель степени у  $Z_{зуб}$ , «по умолчанию» равный нулю); точки x для вариантов значений, свойственных насосам АПД МЗМА-407 и 408, соединены здесь и далее тонкими линиями.

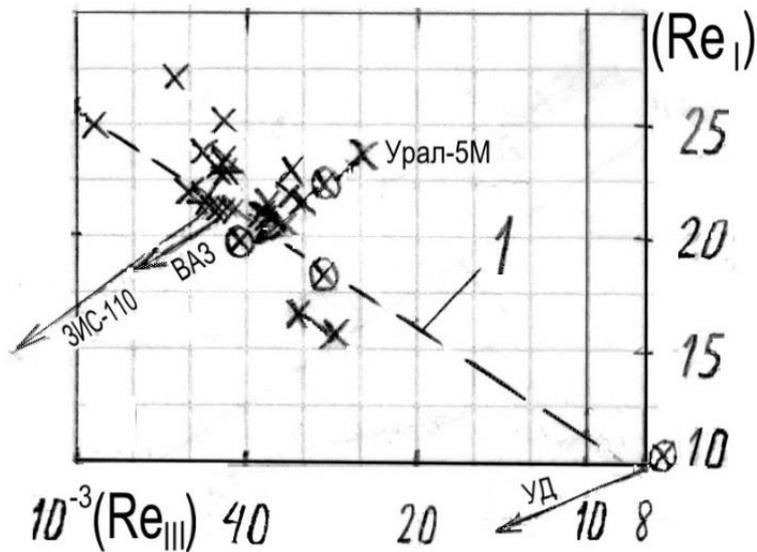


Рис. 2. Зависимость между двумя аналогами критерия Рейнольдса: 1 – линия для совокупности большинства точек (кроме насоса АПД Урал-5М).

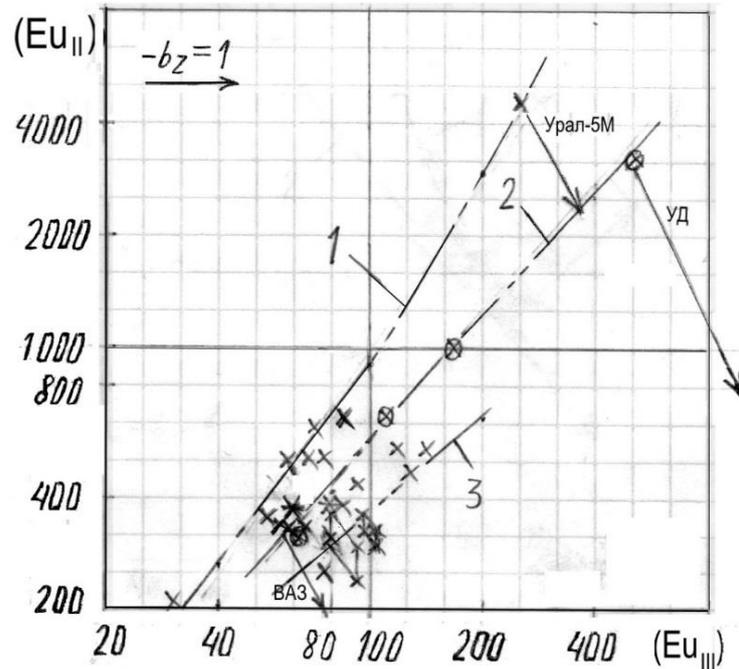


Рис. 3. Зависимости между двумя аналогами критерия Эйлера для насосов: 1 – АПД с жидкостным охлаждением (ГАЗ-14, ЗИЛ-111, ЗИС-110, Урал-5М, 412, М-21, ЗМЗ-24Д, УМЗ); 2 – двигателей с воздушным охлаждением и АПД ВАЗ и ЗМЗ-409 с жидкостным охлаждением; 3 – прочих АПД с жидкостным охлаждением.

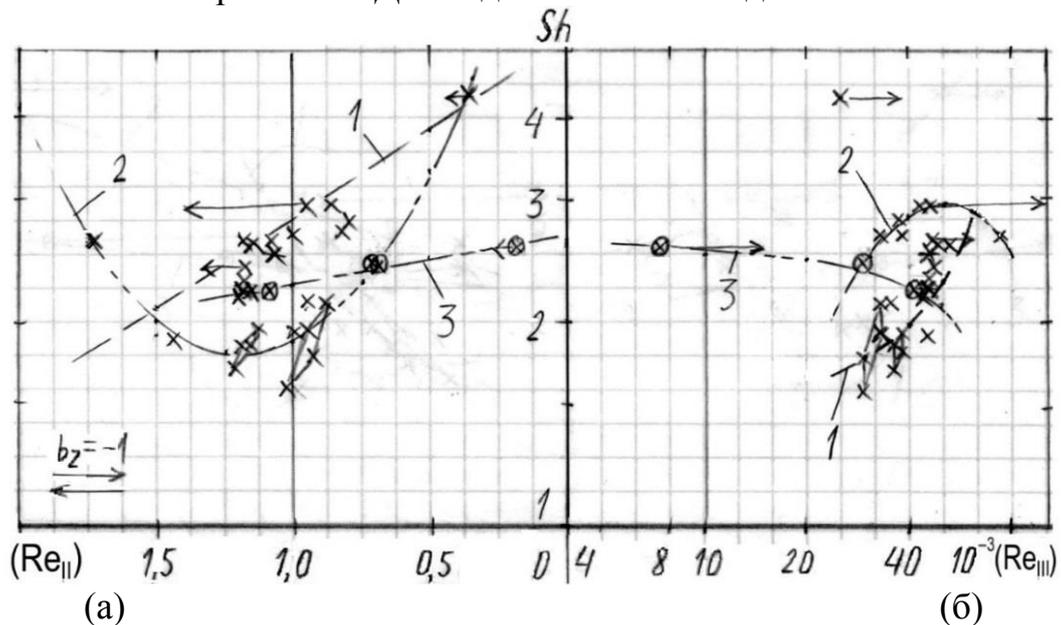
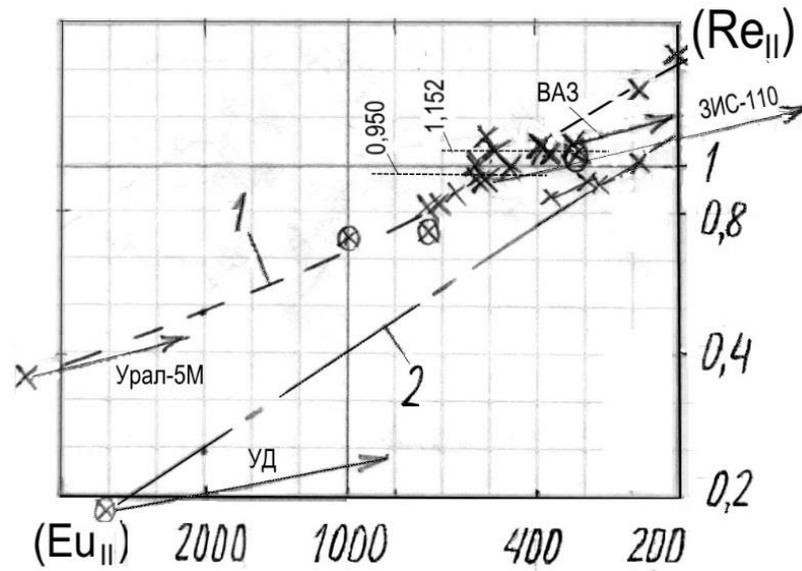
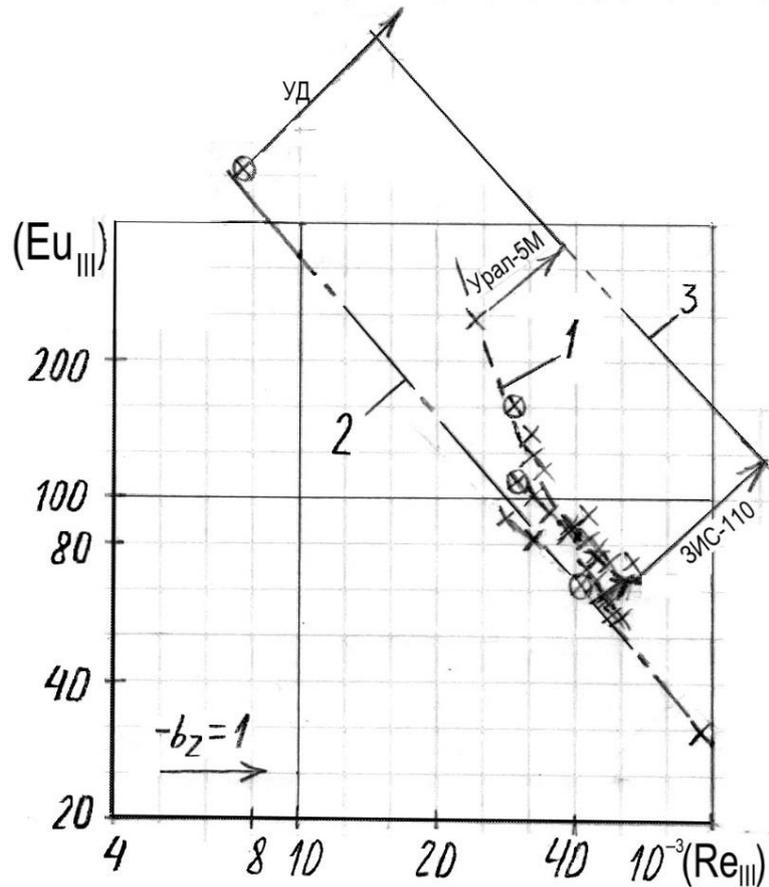


Рис. 5. Зависимости между критерием Струхала и двумя аналогами критерия Рейнольдса: линии 1 - для совокупности большинства точек ((б) – кроме насоса АПД Урал-5М); 2 – для насосов АПД МеМЗ-965, МеМЗ-966А с воздушным охлаждением и с жидкостным охлаждением ((а) ГАЗ-66, ЗМЗ-53, ЗМЗ-511.10, ЗИЛ-111, МЗМА-407, 408, Урал-5М; (б) ЗИЛ-111, ЗИС-110, М-21, ЗМЗ-24Д, УМЗ-451М); 3 – для насосов двигателей с воздушным охлаждением и АПД ВАЗ-21213, ЗИЛ-130, ЗМЗ-409 с жидкостным охлаждением.



(а)



(б)

Рис. 4. Зависимости между различными аналогами критериев Рейнольдса и Эйлера: линии 1 – для совокупности большинства точек; (а) 2 – для насосов двигателей УД и АПД МЗМА-407; (б) 2 – для насосов двигателей УД, АПД ВАЗ, ЗИС-110, МЗМА-407, МемЗ-968, УМЗ-417, УМЗ-4218; 3 – для насосов двигателей УД, АПД ЗИС-110 и Урал-5М при смещении точек ( $b_z = -1$ ). На рис. 4(а) указаны средние значения ( $Re_{II}$ ) для двух групп насосов, внутри которых ( $Re_{II}$ ) слабо изменяется.

В табл. 2 перечислены математические выражения и показатели точности обобщённых зависимостей  $Y(X)$ , показанных на рис. 1 – 6, а в табл. 3 и 4 приведены показатели точности расчёта подачи и давления масла с помощью этих зависимостей. Условный номер ОЗ содержит номер рисунка и номер кривой, изображённой там: например, (1а-1). Единицы измерения СКО такие же, как у зависимой переменной  $Y$ .

Примечания к зависимостям, перечисленным в табл. 2 (опущены слово «двигателей» или слова «для двигателей»):

(1а-1) – верхняя  $b_z = -1$  для ВАЗ и ЗИС-110;

(1а-2)  $b_z = -1$  для УД и Урал-5М;

(1б-1), (4б-3)  $b_z = -1$  для УД, ЗИС-110 и Урал-5М;

(2-1) для Урал-5М относительная погрешность  $-25\%$ ;

(3-1), (4б-1), (5а-1), (6а-2) с повышенными значениями зависимой переменной  $Y$ ;

(3-2), (5а-3), (5б-3), (6а-3), (6б-3) с воздушным охлаждением (ВО) и некоторые другие;

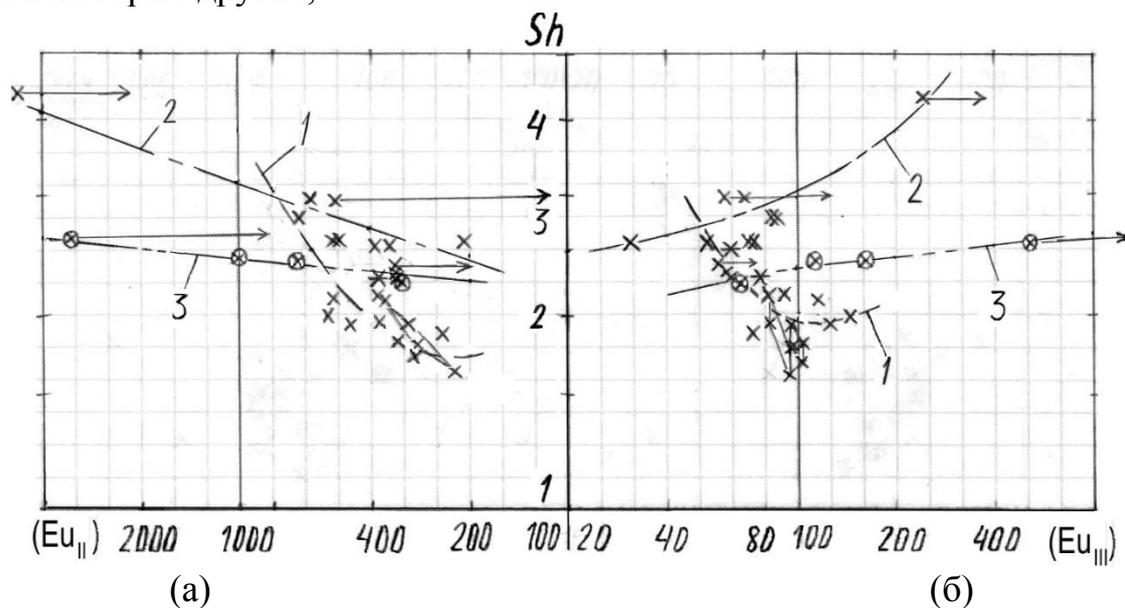


Рис. 6. Зависимости между критерием Струхала и двумя аналогами критерия Эйлера: линии 1 - для совокупности большинства точек; 2 – для насосов АПД с жидкостным охлаждением (ГАЗ-14, ЗИЛ-111, ЗИС-110, М-21, ЗМЗ-24Д, 412, УМЗ, Урал-5М); 3 – для насосов двигателей с воздушным и жидкостным ((а) ВАЗ, ЗМЗ-409; (б) ВАЗ-21213, ЗМЗ-409) охлаждением.

Таблиця 2 – математические выражения и показатели точности обобщённых зависимостей (ОЗ) между аналогами критериев Рейнольдса и Эйлера и критерием Струхала

Переменные и условный номер ОЗ	Правая часть математического выражения $Y=...$	Показатели точности		
		СКО	отн. СКО	пределы ОП, % (для насосов)
1	2	3	4	5
$X=(Re_I),$ $Y=(Re_{II})$				
(1а-1) - верхняя	$\exp(4,22 - 0,444X + 0,0115X^2)$	0,20	0,18	+31,5 (МеМЗ-965) -30 (ВАЗ)
(1а-2)	$\exp(-1,16 - 0,064X + 0,0042X^2)$	0,071	0,11	+13 (Урал-5М) -13 (МеМЗ-966А)
$X=(Re_{III}),$ $Y=(Re_{II})$				
(1б-1)	$\exp(-5,46 + 2,30\ln X - 0,22\ln^2 X)$	0,153	0,15	+25 (ЗМЗ-24Д) -23 (ГАЗ-13)
(1б-2)	$\exp(-1,65 + 0,020X)$	0,023	0,034	+3,9 (УД) -3,0 (Урал-5М)
$X=(Re_{III}),$ $Y=(Re_I)$				
(2-1)	$-4,0 + 6,8\ln X$	2,0	0,093	+17,5 (МЗМА-407) -16 (ГАЗ-14, ЗИЛ-375)
$X=(Eu_{III}),$ $Y=(Eu_{II})$				
(3-1)	$0,041(X + 30)^{2,06}$	98,5	0,11	+17 (УМЗ-4218) -16 (ЗИС-110)
(3-2)	$3,52X^{1,10}$	31,7	0,038	+8,7 (МеМЗ-968) -9,0 (ВАЗ-2101)
(3-3)	$6,5X^{0,87}$	77,5	0,20	+27 (МЗМА-407) -27 (ЗМЗ-409)
$X=(Eu_{II}),$ $Y=(Re_{II})$				
(4а-1)	$\exp(4,40 - 0,887\ln X + 0,0286 \ln^2 X)$	0,087	0,083	+19 (МеМЗ-965) -19 (ГАЗ-14)
(4а-2)	$48,7X^{-0,893}$	0,054	0,078	-6,0...+5,4 (МЗМА-407)

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
X=(Re <sub>III</sub> ), Y=(Eu <sub>III</sub> )				
(46-1)	$\exp(35,3 - 15,5\ln X + 1,93 \ln^2 X)$	22,4	0,21	+19 (МеМЗ-965) -28 (ГАЗ-66)
(46-2)	$5100X^{-1,18}$	13,2	0,13	+11,6 (МЗМА-407) -10,5 (ВАЗ-21213)
(46-3)	$19470X^{-1,10}$	23,7	0,047	+3,2 (Урал-5М) -3,4 (УД)
X=(Re <sub>II</sub> ), Y=Sh				
(5a-1)	$\exp(1,7 - 0,71X)$	0,18	0,068	+12 (МеМЗ-968) -12,5 (ГАЗ-14)
(5a-2)	$\exp(2,42 - 3,10X + 1,30X^2)$	0,12	0,053	+12 (МЗМА-407) -11 (ЗМЗ-511.10)
(5a-3)	$\exp(0,97 - 0,15X)$	0,055	0,024	+2,1 (ЗИЛ-130) -3,1 (ВАЗ-21213)
X=(Re <sub>III</sub> ), Y=Sh				
(5b-1)	$\exp(7,7 - 4,4\ln X + 0,677\ln^2 X)$	0,23	0,105	+15 (ГАЗ-13) -16 (412)
(5b-2)	$\exp(-9,41 + 5,39\ln X - 0,692\ln^2 X)$	0,039	0,0145	+2,2 (М-21) -1,6 (ЗМЗ-24Д)
(5b-3)	$\exp(0,97 - 0,0040X)$	0,070	0,030	+4,1 (ЗИЛ-130) -3,9 (МеМЗ-966А)
X=(Eu <sub>III</sub> ), Y=Sh				
(6a-1)	$\exp(8,90 - 3,18\ln X + 0,302\ln^2 X)$	0,245	0,11	+19 (ГАЗ-66) -15 (412)
(6a-2)	$0,73(X + 100)^{0,21}$	0,144	0,050	+7,0 (УМЗ-4218) -6,5 (ЗИЛ-111)
(6a-3)	$1,68 + 0,108\ln X$	0,060	0,025	+3,9 (МеМЗ-968) -4,0 (ВАЗ-2101)
X=(Eu <sub>III</sub> ), Y=Sh				
(6b-1)	$\exp(10,7 - 4,19\ln X + 0,435\ln^2 X)$	0,22	0,10	+19 (МЗМА-407) -19 (ГАЗ-14)
(6b-2)	$\exp(0,84 + 0,0025X)$	0,15	0,053	+8,1 (УМЗ-4218) -8,4 (ЗИС-110)
(6b-3)	$1,65 + 0,15\ln X$	0,049	0,021	+2,7 (МеМЗ-968) -2,4 (МеМЗ-965)

Таблица 3 – показатели точности расчёта номинальной подачи масла

$Q_{\text{нас}}$  (л/мин) шестерёнными насосами с помощью зависимостей, приведённых в табл. 2

Условный номер ОЗ	Расчётные формулы и ссылки на них	Колич. насосов	Показатели точности			
			СКО, л/мин	отн. СКО	пределы ОП, % (для насосов)	САОП
1	2	3	4	5	6	7
	( $Re_{II}$ ) см. в табл. 2					
(1а-1)	(7), X по (1)	22	6,8	0,18	+31,5 (МеМЗ-965) -23 (ГАЗ-13)	0,146
(1б-1)	(7), X по (3)	26	5,4	0,15	+25 (ЗМЗ-24Д) -23 (ГАЗ-13)	0,118
	( $E_{II}$ ) см. в табл. 2					
(3-1)	(8), X по (5)	10	2,35	0,062	+9,2 (ЗИС-110) -7,8 (УМЗ-4218)	0,054
(3-2)	То же	8	1,2	0,040	+4,8 (ВАЗ-2101) -4,6 (МеМЗ-968)	0,025
(3-3)	То же; умножить на 0,96	11	3,4	0,090	+12,4 (ЗМЗ-409) -15 (МЗМА-407)	0,074
(4а-1)	(13 – 15); X по (4)	23	5,2	0,14	+27 (412) -26 (ЗИЛ-375)	0,097
	Sh см. в табл. 2					
(5а-1)	(9), X по (2); (17 – 19)	16	1,7	0,045	+10,7 (ЗМЗ-409) -7,6 (ВАЗ-21213)	0,029
(5а-2)	(9), X по (2)	10	4,7	0,14	+21 (ЗМЗ-511.10) -48 (МЗМА-407)	0,11
(5а-3)	То же	7	0,96	0,032	+3,5 (МеМЗ-966А) -3,7 (ЗИЛ-130, -375)	0,0225
(5б-1)	(9), X по (3); умножить на 0,95...0,96	18	3,2	0,086	+14 (412) -16,6 (ГАЗ-13)	0,066
(5б-2)	(9), X по (3)	7	0,37	0,011	+1,7 (ЗМЗ-24Д) -1,8 (М-21)	0,010
(5б-3)	То же	7	1,0	0,034	+4,1 (МеМЗ-966А) -4,1 (ЗИЛ-130)	0,024
(6а-1)	(9), X по (4); (17) с измен., (20); умножить на 0,946; умножить на 0,73	2	3,3	0,12	+13,6 (ЗМЗ-24Д) -7,2 (МЗМА-407)	0,091
		11	7,3	0,19	+32 (УМЗ-451М) -26,5 (ГАЗ-13)	0,156
(6а-2)	(9), X по (4)	10	3,6	0,095	+9,8 (ЗИЛ-111) -9,5 (УМЗ-4218)	0,064
(6а-3)	То же	8	1,2	0,040	+4,7 (ВАЗ-2101) -4,5 (МеМЗ-968)	0,0243

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7
	Sh см. в табл. 2					
(6б-1)	(9), X по (5); умножить на 0,91	19	4,1	0,11	+22,6 (ГАЗ-14) -16 (МЗМА-407)	0,078
(6б-2)	(9), X по (5)	10	2,3	0,061	+9,2 (ЗИС-110) -7,6 (УМЗ-4218)	0,048
(6б-3)	То же	6	0,76	0,028	+2,7 (МеМЗ-965) -3,1 (МеМЗ-968)	0,0205

(3-3), (4б-2), (5б-1) с пониженными значениями  $Y$ ;  
 (4а-2) УД, МЗМА-407;  
 (5а-2) с повышенными значениями  $Y$ , также ЗИЛ-111, Урал-5М;  
 (5б-2) с пониженными значениями  $Y$ , кроме Урал-5М;  
 (6а-1) с пониженными значениями  $Y$ , также М-21, ЗМЗ-24Д, УМЗ-451М;  
 (6б-1) с пониженными значениями  $Y$ , также ВАЗ, ГАЗ-14, ЗМЗ-409, 412, МеМЗ-968, УМЗ-417, УМЗ-4218.

На рис. 1(б), 2 – 4 изображены монотонные обобщённые зависимости, а на рис. 1(б), 5 и 6 – как монотонные, так и немонотонные. О степени их силы или «тесноты» можно судить по значениям коэффициента корреляции  $r_{Y\hat{Y}}$  исходных и вычисленных (по формулам табл. 2) значений критериев подобия. Среди аналогов критерия  $Re$  наиболее сильна зависимость (1б-1) и несколько менее – (2-1), для которых  $r_{Y\hat{Y}} = 0,85$  и  $0,82$ , соответственно.

Примечание: во всех случаях аналог критерия Рейнольдса ( $Re_{III}$ ) умножен на  $10^{-3}$ .

Таблица 4 – показатели точности расчёта давления масла  $\Delta p_m$  (МПа) с помощью четырёх зависимостей, приведённых в табл. 2

Условный номер ОЗ	Расчётные формулы и ссылки на них	Кол-во насосов	Показатели точности			
			СКО, МПа	отн. СКО	пределы ОП, %	САОП
1	2	3	4	5	6	7
(2-1)	( $Re_{III}$ ) см. в табл. 2; (10); X по (3)	26	0,075	0,18	+38 (МЗМА-407) -29 (МеМЗ-966А)	0,137
(4а-1)	(11), ( $Eu_{II}$ ) по (16); умножить на 0,977 ( $Eu_{III}$ ) см. в табл. 2	23	0,066	0,155	+39 (МеМЗ-965) -34 (ГАЗ-14)	0,114
(4б-1)	(12); X по (3)	17	0,054	0,123	+31 (МеМЗ-965) -21,6 (ЗИЛ-375)	0,097
(4б-2)	То же	10; также УД	0,032	0,071	+11,6 (МЗМА-407) -11 (ВАЗ-21213)	0,071

Среди аналогов критерия  $Eu$  зависимости теснее, так как для двух

кривых рис. 3  $r_{Y\hat{Y}} \geq 0,99$ . Также весьма сильны зависимости ( $Re_{II}$ ) от ( $Eu_{II}$ ) и ( $Eu_{III}$ ) от ( $Re_{III}$ ) на рис. 4:  $r_{Y\hat{Y}} \geq 0,95$ . На рис. 5 и 6 наибольшие значения  $r_{Y\hat{Y}} = 0,96 \dots 0,988$  достигнуты для верхних кривых (5а-1, 5б-2, 6а-2, 6б-2), а наибольшее значение в среднем для трёх кривых (0,937) получено для рис. 5(а). Физический смысл полученных зависимостей вытекает из формул (1 – 6).

Среди математических описаний 25 зависимостей в табл. 2 преобладают показательные функции линейного, квадратичного и квадратично-логарифмического аргумента (15), а на втором месте по численности – степенные функции (7).

Согласно табл. 2, наименьшими величинами размаха изменения относительной погрешности (ОП) результата расчёта  $Y$  отличаются обобщённые зависимости (1б-2, 4б-3, 5а-3, 5б-2, 5б-3, 6а-3, 6б-3), относящиеся к 3...8 насосам, в том числе к 1...4 насосам двигателей с ВО. Наибольшими величинами этого размаха отличаются зависимости (1а-1, 1б-1, 3-3, 4а-1, 4б-1, 6б-1), относящимися к 11...26 насосам.

Согласно табл. 3, наименьшие величины размаха ОП результата расчёта подачи масла  $Q_{нас}$  получены при использовании зависимостей (3-2, 5а-3, 5б-2, 5б-3, 6а-3, 6б-3), а наибольшие – при использовании зависимостей (1а-1, 1б-1, 4а-1, 5а-2, 6а-1, 6б-1). Видно, что как правило, более точная обобщённая зависимость позволяет и точнее вычислить  $Q_{нас}$ . Что касается показателя САОП, то минимальная САОП 0,010 получена при использовании зависимости (5б-2), относящейся к 7 насосам, а максимальная САОП 0,156 – при использовании зависимости (6а-1) для 11 насосов.

Согласно табл. 4, наименьшая величина размаха ОП результата расчёта давления масла  $\Delta p_m$  получены при использовании зависимости (4б-2), а наибольшие – при использовании зависимостей (2-1) и (4а-1). Минимальная САОП 0,071 получена здесь при использовании зависимости (4б-2), а максимальная САОП 0,137 – при использовании зависимости (2-1), относящихся соответственно к 11 и 26 насосам. Видно, что номинальную подачу масла обычно можно рассчитать точнее, чем его давление.

Обобщённые зависимости (4а-1, 5а-1, 6а-1) могут применяться для расчёта  $Q_{нас}$  с приемлемой точностью только совместно с дополнительными, рассмотренными ниже. В (4а-1) от величины подачи масла зависят и  $X=(Eu_{II})$ , согласно (4), и  $Y=(Re_{II})$ , согласно (2). После логарифмирования обеих частей (4а-1), с учётом (4) и (2), (4а-1) приводится к квадратному уравнению относительно  $\ln Q_{нас}$ , откуда

$$\ln Q_{нас(4a-1)} = -\frac{A_1}{2A_2} \left( -1 \pm \sqrt{1 - \frac{4A_0A_2}{A_1^2}} \right); \quad Q_{нас(4a-1)} = \exp(\ln Q_{нас(4a-1)}), \quad (13)$$

где  $A_2, A_1, A_0$  – коэффициенты этого уравнения:

$$\begin{aligned} A_2 &= 1; A_1 = -\ln a_X + 6,7657; \\ A_0 &= 8,7413(4,4 + \ln(bd_{\text{нар}})^{0,5} - 0,887\ln a_X + 0,0286\ln^2 a_X) \end{aligned} \quad (14)$$

где  $a_X = (Eu_{II})Q_{\text{нас}}^2 = \Delta p_M (bd_{\text{нар}})^2$ ; размеры шестерён насоса  $b$  и  $d_{\text{нар}}$  в миллиметрах, а давление масла  $\Delta p_M$  – в мегапаскалях; при этом подача масла получится в литрах в минуту.

Проверка для 22 насосов показала, однако, что точность расчёта  $Q_{\text{нас}}$  с помощью (13) неудовлетворительная; в ряде случаев  $4A_0/A_1^2 > 1$ , поэтому под знак корня в правой части (13) введён оператор модуля  $|\dots|$ . Чтобы улучшить эту точность, была исследована абсолютная погрешность  $\Delta Q_{\text{нас}}$  этого расчёта при различных знаках перед корнем в (13), а также для полусуммы результатов при обоих знаках. Выявлены подгруппы насосов, для которых результат расчёта  $Q_{\text{нас}}$  с помощью (13) точнее при знаке плюс (в этой подгруппе только насос АПД Урал-5М), минус (в этой подгруппе 8 насосов АПД ВАЗ, ГАЗ-13, ЗМЗ-53, -511.10, 408, УМЗ-417, -4218, ЗИС-110) и для полусуммы обоих вариантов (остальные насосы).

Результат по (13) не исправлялся при знаке минус перед корнем для насосов второй подгруппы, а для насосов других подгрупп из этого результата вычиталась поправочная функция  $\Delta Q_{\text{нас}(4a-1)}$  (л/мин), аппроксимированная выражением

$$\Delta Q_{\text{нас}(4a-1)} = 273 - 74\ln(Eu_{II}) + 5,3\ln^2(Eu_{II}), \quad (15)$$

где аналог критерия Эйлера ( $Eu_{II}$ ) подсчитывается по значению  $Q_{\text{нас}}$ , найденному согласно (13), с помощью формулы (4). Таким образом, точность расчёта подачи масла на основании зависимости (4a-1) стала приемлемой, хотя невысокой.

Если эту зависимость использовать для расчёта давления масла  $\Delta p_M$  при известной его подаче, то из (4a-1) нужно выразить аналог критерия Эйлера:

$$\begin{aligned} \ln(Eu_{II}) &= -15,507\left(-1 + \sqrt{1 - 0,1454(4,4 - \ln(Re_{II}))}\right); \\ (Eu_{II}) &= \exp(\ln(Eu_{II})) \end{aligned} \quad (16)$$

и вычислить  $\Delta p_M$  с помощью формулы (11). В отличие от (13), здесь перед корнем нужно использовать только знак плюс.

Зависимость (5a-1) характерна тем, что от  $Q_{\text{нас}}$  также зависят обе части соответствующего уравнения, которое, с учётом абсолютной погрешности расчёта критерия Струхала  $Sh$ , приводится к виду

$$\frac{Sh_{(5a-1)}Q_{\text{нас}}}{Q_{\text{нас}}} + 0,18k_{\sigma} = \exp\left(1,7 - 0,71 \frac{Q_{\text{нас}}}{\sqrt{bd_{\text{нар}}}}\right), \quad (17)$$

где  $k_{\sigma}$  – коэффициент СКО, в данном случае равный 0,18, согласно табл. 2; произведение  $Sh_{(5a-1)}Q_{\text{нас}}$  не зависит от подачи масла,

согласно (6).

Перед нахождением  $Q_{нас}$  из этого уравнения методом последовательных приближений или итераций, для чего подачу масла нужно было выразить из левой части (17), было исследовано изменение коэффициента СКО для рассматриваемых здесь (то есть для зависимости (5а-1)) 16 насосов (АПД ВАЗ, ГАЗ-13, ГАЗ-14, М-21, ЗМЗ-24Д, -409, ЗИЛ-130 и -375, МеМЗ-968, 412, УМЗ, ЗИС-110, Урал-5М). Оказалось, что величину  $k_{\sigma}$  можно связать с определяющим размером насоса  $(bd_{нар})^{0,5}$  (в миллиметрах) квадратичной функцией, значения коэффициентов которой различны для двух подгрупп насосов (рис. 7(а)). После выражения  $k_{\sigma}$  из неё через этот размер получились формулы:

$$k_{\sigma(5a-1)} = \begin{cases} 0,0906 \left( 1 + \sqrt{25,7647 \sqrt{bd_{нар}} - 896,383} \right) & \text{для ГАЗ-13, ЗМЗ-409, ЗИЛ-130} \\ 0,0906 \left( 1 - \sqrt{25,7647 \sqrt{bd_{нар}} - 896,383} \right) & \text{для ЗИС-110, УМЗ-4218, Урал-5М} \\ 0,2921 \left( 1 + \sqrt{7,2058 \sqrt{bd_{нар}} - 225,62} \right) & \text{для ВАЗ-21213, М-21, МеМЗ-968, УМЗ-451М} \\ 0,2921 \left( 1 - \sqrt{7,2058 \sqrt{bd_{нар}} - 225,62} \right) & \text{для ВАЗ-2101, -2106, ГАЗ-14, 412} \end{cases} \quad (18)$$

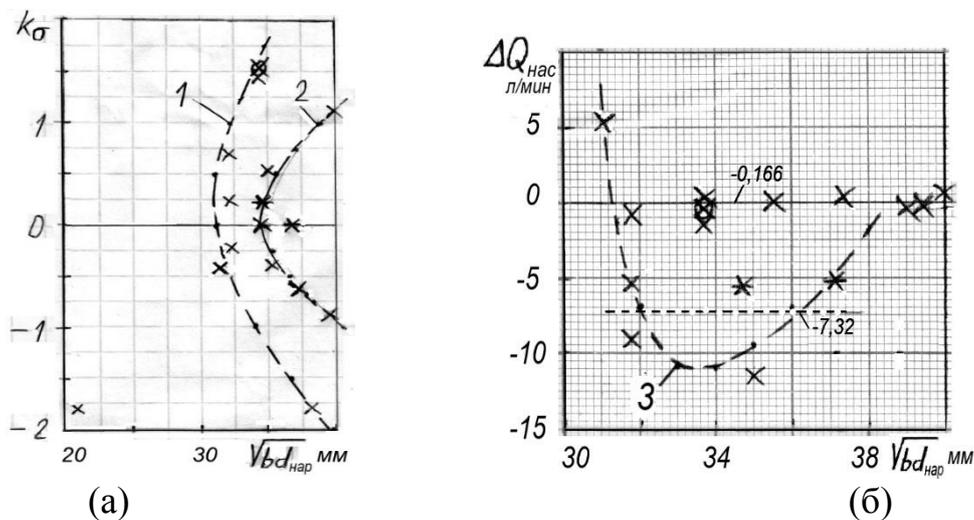


Рис. 7. Вспомогательные зависимости для использования обобщённой зависимости (5а-1) при расчёте подачи масла по (17): (а) коэффициента СКО от определяющего размера насоса; (б) абсолютной погрешности расчёта  $\Delta Q_{нас(5a-1)}$  от этого размера, уменьшённого на 30 мм (указаны средние значения для двух подгрупп насосов); линии 1 и 2 – для верхней и нижней пар формул в правой части (18), соответственно; 3 – по (19).

С использованием (18) были найдены значения подачи масла из (17) методом итераций и установлено, что для 6 насосов (АПД ГАЗ-13, ЗМЗ-409, УМЗ-4218, ВАЗ-2106, -21213, 412) точность её расчёта неудовлетворительная, а для других 10 насосов она приемлемая (относительная погрешность менее 5%). Поэтому для первой

подгруппы насосов с помощью МНК получена зависимость абсолютной погрешности  $\Delta Q_{\text{нас}(5a-1)}$  (л/мин) от смещённого на 30 мм вниз определяющего размера (рис. 7(б)):

$$\Delta Q_{\text{нас}(5a-1)} = 10,209 - 34,17 \ln((bd_{\text{нар}})^{0,5} - 30) + 13,694 \ln^2((bd_{\text{нар}})^{0,5} - 30). \quad (19)$$

Благодаря вычитанию  $\Delta Q_{\text{нас}}$  по (19) из результата расчёта  $Q_{\text{нас}}$  по (17) для этой подгруппы насосов (для второй их подгруппы  $\Delta Q_{\text{нас}}$  была достаточно малой), достигнута приемлемая точность расчёта подачи масла в целом для 16 насосов.

Аналогично расчёту  $Q_{\text{нас}}$  с помощью зависимости (5a-1) вычисляется подача масла и с помощью зависимости (6a-1). Отличия здесь в том, что, согласно табл.2, СКО равно не 0,18, а 0,245; показательная функция в правой части уравнения, аналогичного (17), более сложная и зависит не от  $(Re_{II})$ , а от  $(Eu_{II})$ . Оказалось, что коэффициент СКО хорошо коррелирован с произведением критерия Sh на аналог критерия Рейнольдса  $(Re_{II})$ , причём соответствующую зависимость можно описать разными функциями для двух подгрупп насосов (рис. 8).

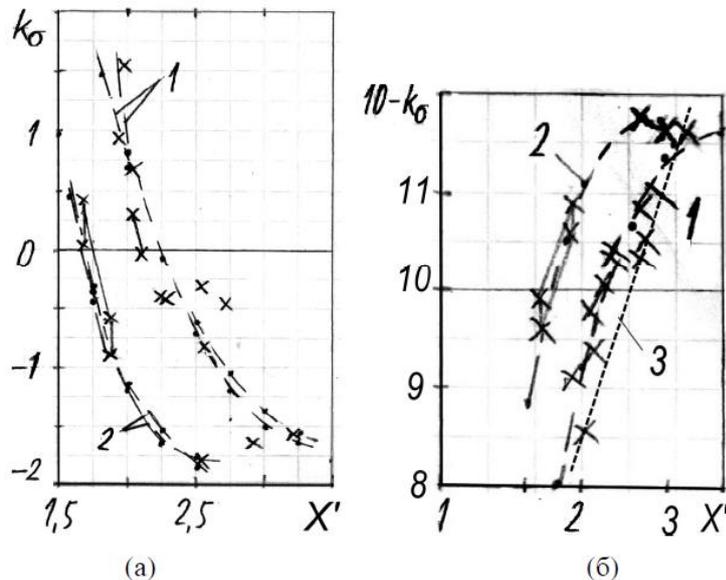


Рис. 8. Зависимости коэффициента СКО, связанного с (6a-1), от произведения  $X' = Sh \cdot (Re_{II})$ : (а) квадратичные, (б) квадратично-логарифмические; 1 – для насосов 12 АД, кроме ЗМЗ-24Д и МЗМА-407; 2 – для насосов двух последних двигателей; 3 – линия хорды.

Выяснилось, что сходимость итераций к конкретному значению  $Q_{\text{нас}}$ , получаемому с помощью изменённого (как сказано выше) уравнения (17), существенно зависит от величины коэффициента СКО. Если он ниже определённой «критической» величины, своей для каждого насоса, то итерации расходятся. Поэтому из возможных

вариантов описания зависимости  $k_{\sigma}$  от переменной  $X'$  выбраны следующие:

$$k_{\sigma(6a-1)} = \begin{cases} 17 - 15,5X' + 3,2X'^2 & \text{для } 3МЗ - 24Д, МЗМА - 407 \\ 5,9 - 6,4 \ln X' & \text{для } ГАЗ, М - 21, 3МЗ - 53, -511.10, ЗИЛ - 130, -375, 408, 412, \\ & УМЗ - 451М \end{cases} \quad (20)$$

Здесь верхнему варианту формулы соответствует линия 2 на рис. 8(а), а нижнему варианту – линия 3 на рис. 8(б).

Дополнительно, для улучшения точности расчёта  $Q_{\text{нас}}$  по (6а-1) необходимо умножить результат, полученный методом итераций, на 0,946 (для насосов АПД 3МЗ-24Д и МЗМА-407) и 0,73 (для других насосов). Таким образом, применение ряда обобщённых зависимостей для расчёта подачи масла может требовать специальных приёмов.

Хотя большинство АПД, перечисленных в табл.1, сейчас не выпускается серийно, многие из них присутствуют на «вторичном рынке». Важнее то, что большинство полученных обобщённых зависимостей применимы к сравнительно недавно разработанным и выпускающимся серийно 4-цилиндровым двигателям 3МЗ-409, УМЗ-417, -421 и их модификациям. Они устанавливаются в основном на популярных легковых автомобилях повышенной проходимости, выпускаемых Ульяновским автозаводом (УАЗ) [14]. На рис. 1 – 6 видно, что точки  $x$  (насосы двигателей 3МЗ-409 и УМЗ-4213 со впрыском бензина) не выделяются из полей точек  $x$  (насосы карбюраторных двигателей), поэтому способ подачи бензина не влияет на возможность обобщения данных о параметрах масляных насосов и систем смазки АПД.

Характерные особенности полученных обобщённых зависимостей: (а) они не содержат параметров двигателей, кроме  $n_{\text{нас}} = 0,5n_n$ , и потому обладают «гибкостью» по отношению к их конструкциям; (б) множественность получаемых с их помощью номинальных значений  $Q_{\text{нас}}$  и  $\Delta p_m$  для одного и того же двигателя. Влияние конструкции двигателя проявляется косвенно, через геометрическую форму ОЗ для их частных реализаций (рис. 1 – 6). Выбрать подходящую обобщённую зависимость можно на основе приведённых в табл. 3 и 4 значений пределов относительной погрешности расчёта этих параметров и САОП. В табл. 5 приведены номера зависимостей, с помощью которых можно вычислять  $Q_{\text{нас}}$  и  $\Delta p_m$  для современных отечественных АПД со впрыском бензина. (Хотя значения давления масла указаны в описаниях этих двигателей, значения же номинальной подачи масла не публиковались и, вероятно, даже не измерялись.)

Для двигателя 3МЗ-409 подачу масла можно вычислить по 9

зависимостям, из которых, согласно табл.3, минимальная САОП 0,0205 характерна для (6б-3); немного хуже точность расчёта  $Q_{\text{нас}}$  по зависимостям (3-2, 5а-3, 5б-3, 6а-3). Поэтому  $Q_{\text{нас}}$  можно вычислить либо с помощью (6б-3), либо получить пять результатов с помощью всех этих зависимостей и взять среднее их значение. Давление масла для этого двигателя можно вычислить по трём зависимостям (2-1, 4а-1, 4б-1), из которых минимальная САОП 0,097 у (4б-1).

Таблица 5 – Обобщённые зависимости, пригодные для расчёта номинальных подачи и давления масла у современных отечественных АПД

Двигатель	Для расчёта подачи масла					Для расчёта давления масла						
	(1а-1)	(1б-1)	(4а-1)	(6б-1)	(3-2)	(5а-3)	(5б-3)	(6а-3)	(6б-3)	(2-1)	(4а-1)	(4б-1)
ЗМЗ-409												
УМЗ-4213												

Для двигателя УМЗ-4213 минимальная САОП 0,029 расчёта подачи масла свойственна рассмотренной выше зависимости (5а-1), но проще пользоваться менее точной зависимостью (5б-1) с САОП 0,066. Зависимости (3-1, 6а-2, 6б-2) занижают результат для этого двигателя на 8...10%, поэтому при их использовании для расчёта  $Q_{\text{нас}}$  нужно умножать результат примерно на 1,1. Из трёх зависимостей, по которым можно найти давление масла для этого двигателя, минимальная САОП 0,071 у (4б-2). Чтобы читатель мог рассчитать  $Q_{\text{нас}}$  и  $\Delta p_{\text{м}}$  для этих двигателей с помощью перечисленных зависимостей, нужно принять частоту вращения  $n_{\text{нас}}$  равной половине номинальной частоты вращения коленчатого вала, указанной в их описаниях, и величину определяющего размера масляного насоса  $(bd_{\text{нар}})^{0,5}$  (34,7 мм для ЗМЗ-409 и 37,1 мм для УМЗ-4213), полученную на основе размеров шестерён [14; 15].

Выше предполагалось, что размеры шестерён масляного насоса и, следовательно, его определяющий размер известны. Но при разработке нового АПД ни одна из известных конструкций таких насосов может не подойти, и потребуются найти рациональные значения этих размеров. Выбрать величину определяющего размера насоса  $(bd_{\text{нар}})^{0,5}$  (мм), необходимую для использования рассмотренных обобщённых зависимостей, можно с помощью регрессионной зависимости этого параметра от рабочего объёма  $i_{\text{цил}} V_{\text{н}}$  (л) отечественных АПД (рис. 9), полученной на основе сведений, опубликованных в [5] и описаниях более новых двигателей.

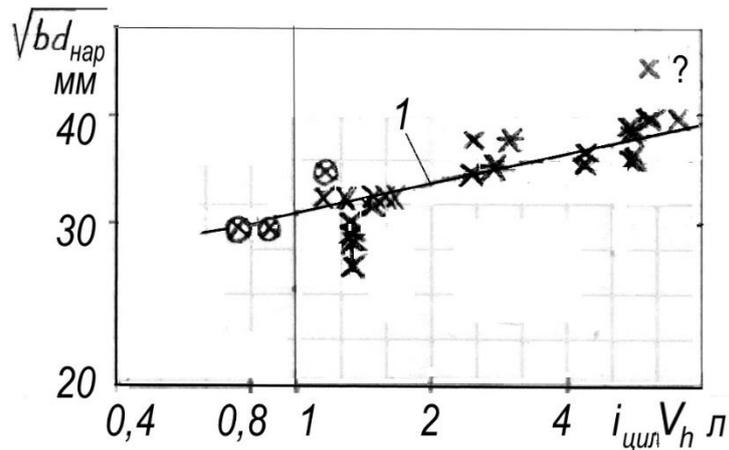


Рис. 9. Статистическая зависимость определяющего размера шестерённого масляного насоса от рабочего объёма бензинового автомобильного двигателя (знак ? – предполагаемая точка для насоса АПД ЗИЛ-114).

Основное поле точек на рис. 9 соответствует насосам с шириной шестерён  $b \approx 30 \dots 41$  мм и аппроксимировано степенной функцией (линия 1)

$$(bd_{\text{нар}})^{0,5} \approx 31(i_{\text{цил}} V_h)^{0,11}, \quad (21)$$

для которой СКО  $\sigma \approx 1,5$  мм, относительное СКО 0,0425 и пределы изменения относительной погрешности примерно  $\pm 8\%$  (нижний предел для УМЗ-417, верхний – для ГАЗ-13). Для насосов с  $b < 30$  и  $b > 41$  мм (как у АПД МЗМА-407, 408, ЗИЛ-111 и стационарного двигателя УД1) к результату по (21) нужно прибавить корректирующую функцию ширины шестерни ( $13,1 \ln b - 43,3$ ). Если эта ширина выбрана, то с помощью (21) легко найти наружный диаметр шестерни  $d_{\text{нар}}$ , от которого зависит модуль зубчатого зацепления, равный  $d_{\text{нар}}/(2+z_{\text{зуб}})$ .

Значение отношения  $b/d_{\text{нар}}$  для большинства исследованных насосов находится в пределах примерно 0,73...1,1 и тем выше, чем больше разность размеров ( $b - d_{\text{нар}}$ ) с учётом её знака.

#### Выводы.

1. Приведенные иллюстрации (рис. 1 – 6) свидетельствуют, что не удалось получить единую обобщённую зависимость (ОЗ), характеризующую данные обо всех рассмотренных масляных насосах и системах смазки двигателей. Наименьшая расслоенность свойственна ОЗ между аналогами критерия Рейнольдса: (1б-1), позволяющей рассчитать номинальную подачу масла с САОП 0,118, и (2-1), позволяющей вычислить его избыточное давление с САОП 0,137. Этим ОЗ не подчиняются указанные параметры системы смазки АПД Урал-5М.

2. Наиболее точен расчёт номинальной подачи масла с помощью ОЗ (5б-2) с САОП 0,010, характеризующей масляные насосы 7 двигателей (двух с воздушным охлаждением и также М-21, ЗМЗ-24Д,

ЗИЛ-111, ЗИС-110, УМЗ-451М с жидкостным).

3. Наиболее точен расчёт избыточного давления масла с помощью ОЗ (46-2) с САОП 0,071, характеризующей масляные насосы 11 двигателей: стационарных УД и автомобильного МеМЗ-968 с воздушным охлаждением, и также АПД ВАЗ, ЗИС-110, ЗИЛ-111, МЗМА-407, УМЗ-417, -4218 с жидкостным.

4. Большинство полученных ОЗ могут применяться для расчёта номинальных подачи и давления масла в системах смазки современных 4-цилиндровых двигателей ЗМЗ-409, УМЗ-4213 и их модификаций. В то же время, ОЗ не содержат каких-либо параметров двигателя, оборудованного шестерённым масляным насосом (кроме частоты вращения его валика, равной практически всегда половине номинальной частоты вращения коленчатого вала). Желательно получение экспериментальных данных о номинальной подаче масла шестерёнными насосами в этих двигателях.

#### Литература:

1. *Зейнетдинов Р.А.* Проектирование автотракторных двигателей : Учеб. пособие / *Р.А. Зейнетдинов* [и др.]; Ульяновский гос. технич. ун-т. Ульяновск, 2004. 168 с.
2. *Тимченко І.І., Жадан П.В., Жилін С.С.* Системи ДВЗ : Навч. посібник / За заг. ред. І.І. Тимченка. Харків: ХНАДУ, 2007. 204 с.
3. *Шатров М.Г.* Автомобильные двигатели: курсовое проектирование : Учеб. пособие / *М.Г. Шатров* [и др.]; под ред. М.Г. Шатрова. М.: Академия, 2011. 256 с.
4. *Запов Ю.И., Лашко В.А.* Системы топливоподачи, охлаждения и смазки поршневых двигателей : Учеб. пособие. Хабаровск: Изд. ТОГУ, 2009. 202 с.
5. *Гугин А.М.* Быстроходные поршневые двигатели: Справочник. Л.: Судостроение, 1967. 260 с.
6. *Фучаджи К.С., Кауфман Ш.М.* Автомобиль «Запорожец» ЗАЗ-965А. М.: Транспорт, 1969. 336 с.
7. *Бабкин Г.Ф.* Автомобильный двигатель ЗИЛ-130 / *Г.Ф. Бабкин* [и др.]; под ред. А.М. Кригера. М.: Машиностроение, 1973. 264 с.
8. Двигатели внутреннего сгорания. Системы поршневых и комбинированных двигателей / Под общ. ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1985. 456 с.
9. *Навроцкий К.Л.* Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов. М.: Машиностроение, 1991. 384 с.
10. *Осипов А.Ф.* Объемные гидравлические машины. Основы теории и расчет гидродинамических и тепловых процессов. М.: Машиностроение, 1966. 160 с.
11. *Чайнов Н.Д.* Конструирование двигателей внутреннего

сгорания: Учебник [Текст]/ Н.Д. Чайнов [и др.]; Под ред. Н.Д. Чайнова. - М.: Машиностроение, 2008. - 496 с.

12. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973. 320 с.

13. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М.: Наука, 1968. 288 с.

14. Автомобили УАЗ-31601, УАЗ-31602 [и др.]. Руководство по техническому обслуживанию и ремонту ИР 05808600.046-2004 / ОАО «Ульяновский автомобильный завод». [Ульяновск], 2004. 272 с.

15. UAZ Patriot. Бензиновый двигатель ЗМЗ-409. М.: Третий Рим, б.г. 268 с. (Серия «Ремонт без проблем».)

## РОЗРАХУНОК НОМІНАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ СИСТЕМ ЗМАЩЕННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДВИГУНІВ З ДОПОМОГОЮ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МІЖ ГІДРОДИНАМІЧНИМИ КРИТЕРІЯМИ ПОДІБНОСТІ

Стефановський О.Б.

**Анотація** – в статті узагальнені опубліковані відомості про параметри і показники шестерінчастих масляних насосів із зовнішнім зачепленням, що застосовувалися і застосовуються у вітчизняних автомобільних двигунах з іскровим запалюванням. Вирази для критеріїв подібності Рейнольдса, Ейлера і Струхала, використаних в гідродинаміці і дослідженнях гідроприводів, модифіковані так, щоб в них входили основні параметри і показники цих насосів. На підставі гіпотези про однорідність фізичного стану подібних за складом моторних масел при нормальному тепловому режимі автомобільних двигунів, замість самих критеріїв Рейнольдса і Ейлера розглянуто зміну їх розмірних аналогів, що не залежать від властивостей масел. Як визначальний розмір вибране «середнє геометричне» осьової довжини (ширини) і зовнішнього діаметра шестерень насоса. Отримано ряд узагальнених залежностей між зазначеними критеріями, з тією або іншою точністю характеризують різні сукупності досліджених масляних насосів. Розроблено способи розрахунку номінальної подачі масла і його надмірного тиску з використанням цих залежностей, з цих способів обрані найбільш вдалі. Середня по абсолютній величині відносна похибка (САВП) розрахунку подачі масла змінюється від 0,010 до 0,156 (при зміні відповідної кількості насосів від 7 до 11), а для найбільш загальних залежностей, що

характеризують 22...26 насосів, знаходиться в межах 0,10...0,15. САВП розрахунку тиску масла змінюється від 0,071 до 0,137 (при зміні відповідної кількості насосів від 11 до 26). Для використання деяких узагальнених залежностей запропоновані додаткові співвідношення параметрів, що поліпшують збіжність ітерацій і знижують відносну похибку результатів розрахунку подачі масла. Більшість отриманих узагальнених залежностей придатні для розрахунку подачі і тиску масла в системах змащення сучасних автомобільних двигунів з уприскуванням бензину (ЗМЗ-409, УМЗ-4213). Для цих двигунів зіставлена точність результатів, одержуваних за допомогою різних залежностей, і зроблені рекомендації про вибір останніх.

**Ключові слова** - двигун, система мастила, подача масла, тиск масла, залежність.

## **CALCULATION OF AUTOMOTIVE ENGINE LUBRICATION SYSTEM RATED PARAMETERS WITH USING OF CORRELATIONS BETWEEN HYDRODYNAMICAL SIMILARITY CRITERIA**

A. Stefanovsky

### *Summary*

The article summarizes the published information on the parameters of gear oil pumps with external gearing, which were and are used in domestic car and truck engines with spark ignition. The expressions for the similarity criteria of Reynolds, Euler, and Strouhal used in hydrodynamics and hydraulic drive research are modified so that they include the main parameters of these pumps. Based on the hypothesis about the homogeneity of the physical state of engine oils with a similar composition under normal thermal conditions of automobile engines, instead of the Reynolds and Euler criteria themselves, a change in their dimensional analogs independent of the oil properties is considered. The "geometric mean" of the axial length and the outer diameter of the pump gears is selected as the determining size. Several generalized correlations between these criteria are obtained characterizing the various aggregates of the studied oil pumps with different degree of accuracy. Methods are developed for the calculation of rated oil flow rate and excess pressure using these correlations; the most successful of these methods are selected. The absolute average relative error (AARE) for the calculation of the rated oil flow rate varies from 0.010 to 0.156 (when the corresponding number of pumps changes

from 7 to 11), and for the most common correlations characterizing 22 ... 26 pumps it is in the range of 0.10 ... 0.15. At the calculation of oil pressure AARE varies from 0.071 to 0.137 (when the corresponding number of pumps changes from 11 to 26). To use some generalized correlations, additional parameter functions are proposed to improve the convergence of iterations and reduce the relative error of calculation results for the rated oil flow rate. Most of the obtained generalized correlations are suitable for calculating the rated oil flow rate and pressure in the lubrication systems of modern automobile engines with gasoline injection (ZMZ-409, UMZ-4213). For these engines, the accuracy of results obtained with using different correlations is compared and recommendations are made on choosing them.

**Keywords** - engine, lubrication system, oil supply, oil pressure, dependence.