

Д. А. Карих, А. Ф. Тихонов

К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ ЯМЗ-240Н С ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЕМ ВТИ-4 И ЭЖЕКЦИОННЫМ УДАЛЕНИЕМ ПЫЛИ ИЗ ПЫЛЕСБОРНИКА

Впервые в нашей стране на транспортных машинах большой грузоподъемности начинают применяться в качестве силовой установки турбопоршневые двигатели с газовой связью мощностью 500 л. с.

Эксплуатация машин в различных климатических зонах, в горных условиях и в глубоких карьерах предъявляет ряд специфических требований к узлам и агрегатам систем двигателя. К их числу относятся: нейтрализация отработавших газов, обогрев газами днища платформы, применение эффективных воздушных фильтров с автоматическим удалением пыли из пылесборника при помощи энергии отработавших газов и др.

Удовлетворение перечисленных требований приводит к повышенным сопротивлениям на впуске и выхлопе. Следует ожидать, что повышенное сопротивление на всасывании и рост противодавления выхлопу за турбиной в первую очередь изменяют рабочий процесс турбокомпрессора и, в конечном итоге, снижают мощность двигателя, увеличивают удельный расход топлива, изменяют температурный режим двигателя и др.

Завод-изготовитель турбопоршневых двигателей для обеспечения нормальных условий эксплуатации двигателя ограничивает величину сопротивления впускного тракта перед входом в компрессор до 400 мм вод. ст., а выпускного тракта за турбокомпрессором до 40 мм рт. ст.; температура воздуха на входе в воздухоочиститель не должна превышать температуру окружающей среды более чем на 5°C [1].

В настоящее время нет достаточно подходящих зависимостей для определения потери мощности, экономичности и других показателей для турбопоршневых дизельных двигателей. Размеры снижения мощности и увеличения удельного расхода топлива зависят от конкретных условий работы двигателя и, в частности, от того, с каким коэффициентом избытка воздуха и давлением наддува работает двигатель.

По данным Д. А. Портнова, для турбопоршневых двигателей с механической связью при коэффициенте избытка воздуха 1,85 и давлении наддува 2,3 кг/см² одновременное понижение давления на всасывании в компрессор на 0,1 кг/см² и повышение давления за турбиной на 0,25 кг/см² сопровождается понижением мощности приблизительно на 9—10% [2].

Степень влияния сопротивлений на мощностные и экономические показатели турбопоршневого двигателя с газовой связью в большой мере зависит от его внешних систем и может быть надежно определена только исследовательским путем.

На 40-тонном самосвале БелАЗ-548А система питания воздухом турбопоршневого двигателя ЯМЗ-240Н состоит из трех инерционно-

масляных воздухоочистителей типа ЯМЗ-236 с фильтрующей набивкой из капроновой щетины. Такие воздухоочистители предназначены для работы в условиях запыленности воздуха до $0,4 \text{ г/м}^3$. При максимальном расходе воздуха $600 \text{ м}^3/\text{ч}$ сопротивление составляет 125 мм вод. ст. , процент очистки воздуха $98,42$. Через $12\text{—}13$ часов работы воздухоочистителя при расходе воздуха 80% от максимального в условиях запыленности на входе $0,4 \text{ г/м}^3$ сопротивление достигает $600\text{—}700 \text{ мм вод. ст.}$

Опыт эксплуатации машин в условиях повышенной запыленности, достигающей в некоторых карьерах 1 г/м^3 и более при высокой температуре окружающего воздуха, показывает, что необходимо сокращать периоды между техническим обслуживанием системы питания воздухом до $7\text{—}8$ часов работы двигателя. Каждое обслуживание вызывает простой высокопроизводительных машин, требует промывки фильтрующих элементов и замены масла (на три фильтра идет $3,6 \text{ кг}$ масла ДС-8). Следовательно, эксплуатация двигателей с недостаточно эффективными воздухоочистителями дорого обходится народному хозяйству.

Наиболее эффективны комбинированные, двухступенчатые воздухоочистители. Они имеют явные преимущества: периодичность обслуживания увеличивается в 5 раз, а расход масла и затрата времени соответственно уменьшается в $4,5$ и $3,5$ раза [3].

В настоящее время мы не располагаем высокоэффективным комбинированным воздухоочистителем, рассчитанным на укомплектование турбопоршневого двигателя ЯМЗ-240Н с максимальным часовым расходом воздуха $1600 \text{ м}^3/\text{ч}$ и сопротивлением, не превышающим $200\text{—}250 \text{ мм вод. ст.}$ Однако для очистки воздуха, поступающего в безнаддувные двигатели мощностью $360\text{—}375 \text{ л. с.}$, используется комбинированный воздухоочиститель ВТИ-4, рассчитанный на максимальный расход воздуха $1400 \text{ м}^3/\text{ч}$. Он состоит из инерционного аппарата сухой очистки воздуха, бункера-пылесборника (первая ступень очистки), трех прямоугольных кассет, заполненных тонкой стальной проволокой-канителью и пропитанных маслом (вторая ступень очистки). Пыль из пылесборника удаляется автоматически и непрерывно в течение всей работы двигателя с помощью эжекционного устройства. Обладает высоким процентом очистки в циклонах ($72\text{—}85\%$ в зависимости от расхода). Общий процент очистки ВТИ-4 находится в пределах $99,0\text{—}99,5\%$. Продолжительность работы воздухоочистителя при 70% -ном расходе воздуха от максимального и 10% -ном отсосе воздуха из пылесборника в условиях запыленности на входе 1 г/м^3 при достижении 600 мм вод. ст. составляет 15 часов.

Анализ приведенных данных позволяет утверждать, что наиболее эффективен ВТИ-4. Однако, несмотря на ряд преимуществ, целесообразность комплектования турбопоршневого двигателя ЯМЗ-240Н этим воздухоочистителем проблематична. С одной стороны, для обеспечения оптимальных условий работы турбокомпрессора, а, следовательно, и двигателя ЯМЗ-240Н в целом (показателей мощностных, экономических и др.) необходимо иметь малое сопротивление на входе в компрессор и на выходе из турбины. С другой стороны, имеется эффективный воздухоочиститель ВТИ-4 с гидравлическим сопротивлением, значительно превышающим допустимые величины. Для удаления пыли из пылесборника необходим эжектор, работающий за счет кинетической и тепловой энергии отработавших газов и требующий для обеспечения надежной работы больших сопротивлений выхлопного тракта ($70\text{—}80 \text{ мм рт. ст.}$). При меньших сопротивлениях в выхлопной системе

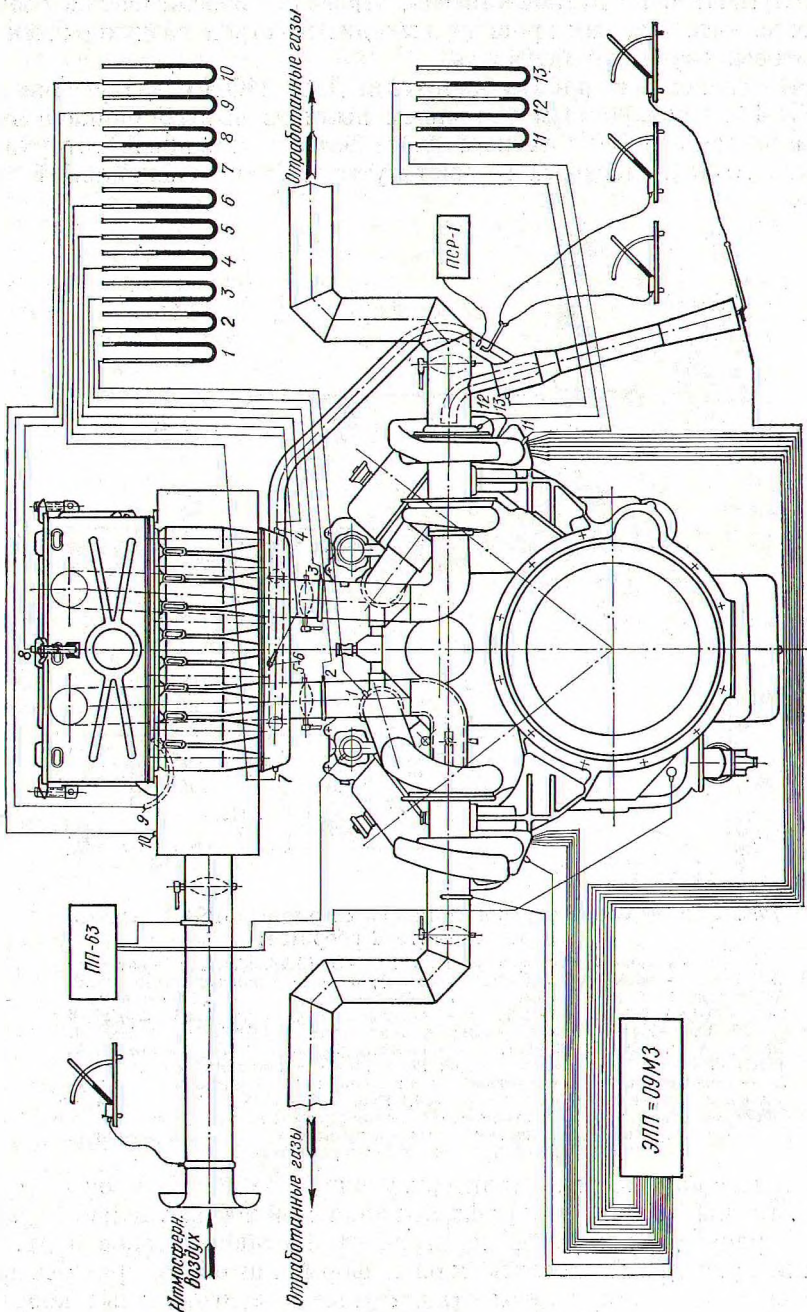


Рис. 1. Принципиальная схема установки турбопоршневого дизеля с воздушным фильтром ВТД-4: 1—13 — пьезометры.

разрежение, образуемое двигателем при засасывании воздуха, преобладает над разрежением, создаваемым эжектором. В результате горячие газы поступают в воздухоочиститель, вызывая воспламенение масла, оплавление кассет и, как правило, выходит из строя воздухоочиститель, а в некоторых случаях и двигатель.

Для исследования работы двигателя ЯМЗ-240Н с воздухоочистителем ВТИ-4 и эжекционным удалением пыли из пылесборника в экспериментальном цехе Белорусского автозавода с помощью сотрудников Белорусского технологического института создан специальный стенд (рис. 1).

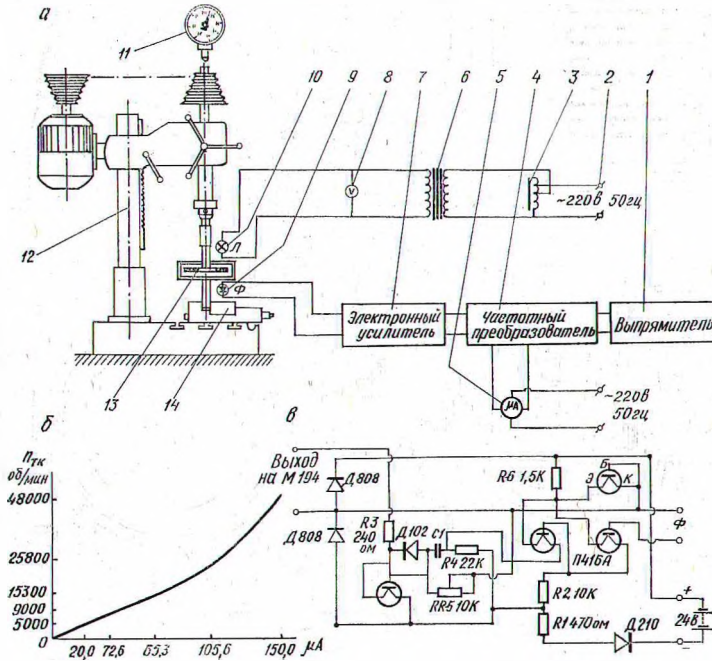


Рис. 2. а — схема тарировки микроамперметра М194 с использованием имитатора оборотов;

1 — стабилизированный выпрямитель ВСП-50 (АЭЗ.215.0051V; имитирует 24 в); 2 — электросеть (~220 в, 50 гц); 3 — автотрансформатор типа АТР2м220в 2 а; 4 — частотный преобразователь; 5 — микроамперметр типа М-194 (ГОСТ 8711-69); 6 — трансформатор типа ТПБ 220/127/36 (ГОСТ 10291-62); 7 — электронный усилитель типа УЭУ-109 (127/200 в, 50 вт, 50 гц, IV-25-07-278-68); 8 — вольтметр типа ЭЗ77 (шкала 0-15V, ГОСТ 8711-60); 9 — фотодиод ФД-3; 10 — лампа накаливания (11V, 40 вт); 11 — тахометр ручной магнитный (тип ИО-30); 12 — настольный сверлильный станок НС-12-А (n=450, 800, 1400, 2500, 4500); 13 — имитатор оборотов (диск с 20 отверстиями); 14 — тиски станочные;

б — зависимость показания микроамперметра от числа оборотов;

в — схема частотного преобразователя.

Основные параметры, характеризующие рабочий процесс турбопоршневого двигателя, — это эффективная мощность, удельный расход горючего, расход воздуха, температура отработавших газов и др. Для получения правильной и безотказной информации об измеряемых параметрах на стенде установлены стандартные и оригинальные конструкции измерительных приборов и оборудование различного назначения. Для определения крутящего момента и момента трения двигателя использован электрический динамометр АНД-63-2.

Число оборотов ротора турбокомпрессора контролируется бесконтактным методом (фотодиод ФД-3) с использованием в качестве ре-

гистрирующего прибора микроамперметра. Предварительная тарировка прибора осуществлялась специальным механическим имитатором, позволяющим передать на фотодиод 96 тыс. импульсов в минуту (48 тыс. оборотов ротора турбины) (рис. 2).

Температура отработавших газов на выходе из цилиндров, на входе и выходе из турбины, а также газозооушной смеси за эжектором измерялась с помощью термоэлектродных пар, термо-э. д. с. — электронным самопишущим многоточечным потенциометром ЭПП-09МЗ. Перепад температур газов на турбине замерялся дифференциальной хромель-алюмелевой термопарой, а повышение температуры воздуха в компрессоре — хромель-копелевой термопарой. Регистрирующим прибором служил переносной потенциометр ПП-63 класса 0,05. Для поддержания постоянства температуры свободные концы термопар погружались в пробирку с трансформаторным маслом. Спаи были прижаты ко дну пробирки, которая помещалась в сосуд Дьюара, заполненный толченым льдом с водой.

Разрежение на стенках коллектора входа во всех точках замера воздухоочистителя ВТИ-4, в корпусе эжектора, на входе в правый и левый компрессоры измерялось с помощью U-образных водяных (ртутных) пьезометров.

Динамический напор и статическое давление воздушного потока в трубопроводе отсоса пыли из пылесборника воздухоочистителя замерялось пневмометрической трубкой Пито.

Давление воздуха за компрессором (давление наддува), давление отработавших газов перед и после турбины измеряется дифференциальным манометром ДТ-50, динамический напор за эжектором — угловой напорной трубкой, которая сообщается с чашечным многопредельным микроманометром ММН.

Контрольный расход топлива определялся весовым способом.

Расход воздуха двигателем G_v измеряется двумя коллекторами входа. Их края профилированы по лемнискату Бернулли, которая имеет уравнение

$$\rho^2 = 2a^2 \cdot \cos 2\varphi,$$

где $a = 0,7 d$.

Продолжением коллектора входа служит соответствующего диаметра трубопровод, длина которого равна $14 d$. Процентное содержание компонентов в отработавших газах определялось газоанализатором ГХП-3.

При оборудовании стенда особое внимание обращалось на максимальное приближение условий исследования к условиям эксплуатации двигателя на машине.

Замеры всех характеризующих цикл величин производились при установившемся режиме, т. е. выдерживалось время, достаточное для тепловой стабилизации двигателя.

Испытание двигателя и обработка результатов производились в соответствии с ГОСТ 491-55 и ГОСТ 10 033-62.

При обработке результатов испытаний использовались известные расчетные соотношения.

Мощность, развиваемая двигателем, находится по формуле

$$N_e = N_{\sigma} + N_{зв} \lambda, \text{ с.},$$

где $N_{\sigma} = \frac{M_{кб} \cdot n_{кб}}{716,2}$ — мощность, развиваемая балансирной машиной.

Среднее эффективное давление цикла

$$P_e = \frac{225 \cdot \tau \cdot N_e}{V_h \cdot i \cdot n} \text{ кг/см}^2,$$

где $\tau = 4$ — тактность двигателя;
 $V_h = 1,86$ — рабочий объем цилиндра, л;
 $i = 12$ — число цилиндров.

Часовой расход топлива двигателем

$$G_T = \frac{3,6 \cdot g_T}{t} \text{ кг/ч.}$$

Эффективный удельный расход топлива

$$g_e = \frac{G_T}{N_e} \cdot 10^3 \text{ г/элсч.}$$

Общий расход воздуха двигателем

$$G_B = G_1 + G_2 \text{ кг/ч,}$$

где

$$G_1 = \frac{2,314}{1000} \cdot d_{1k}^2 \cdot V \sqrt{\Delta P_1} \cdot \sqrt{\frac{B - \Delta P_1}{T}}, \text{ кг/ч;}$$

$$G_2 = \frac{2,314}{1000} \cdot d_{2k}^2 \cdot V \sqrt{\Delta P_2} \cdot \sqrt{\frac{B - \Delta P_2}{T}}, \text{ кг/ч.}$$

Коэффициент избытка воздуха

$$\alpha = \frac{G_b}{G_T \cdot l_0},$$

где $l_0 = 14,3 \text{ кг/кг}$ — теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива.

При снятии нагрузочной характеристики двигателя при $n_{дв} = 1500 \text{ об/мин}$ получены следующие результаты. Давление наддувочного воздуха, поступающего в цилиндры двигателя, увеличилось с 0,989 до 1,286 кг/см², т. е. на 30,03%. Давление газов перед турбиной увеличилось с 1,117 до 1,262 кг/см², т. е. на 12,98%, противодавление выхлопу за турбиной — с 366 до 916 мм вод. ст.; сопротивление на впуске в компрессор — с 178 до 260 мм вод. ст. Максимальное сопротивление ВТИ-4: за I ступенью — 126; за II — 173; в пылесборнике — 186 мм вод. ст.; в корпусе эжектора — 308. Разрежение в трубке отсоса пыли увеличилось с 134 до 223 мм вод. ст. Давление газовой смеси на выходе из диффузора эжектора в начале опыта составляло — 23, в конце — 59 мм вод. ст.

Число оборотов ротора турбокомпрессора возросло с 21 500 до 35 000 в минуту, т. е. на 62,79%.

Температура газов на выходе из цилиндров: в начале опыта 242—270, в конце 672—756°C, перед турбиной соответственно 205 и 628°C; после турбины 200 и 600°C.

При снятии нагрузочной характеристики двигателя при $n_{дв} = 2100$ об/мин получены следующие результаты. Давление наддувочного воздуха увеличилось с 1,039 до 1,176 кг/см², т. е. на 13,19%; давление газов перед турбиной — с 1,246 до 1,341 кг/см² т. е. на 7,62%; противодавление за турбиной — с 692 до 1034 мм вод. ст. На впуске в компрессор сопротивление в начале опыта составляло 478, а в конце — 567 мм вод. ст. Сопротивление ВТИ-4 максимальное: за I ступенью —

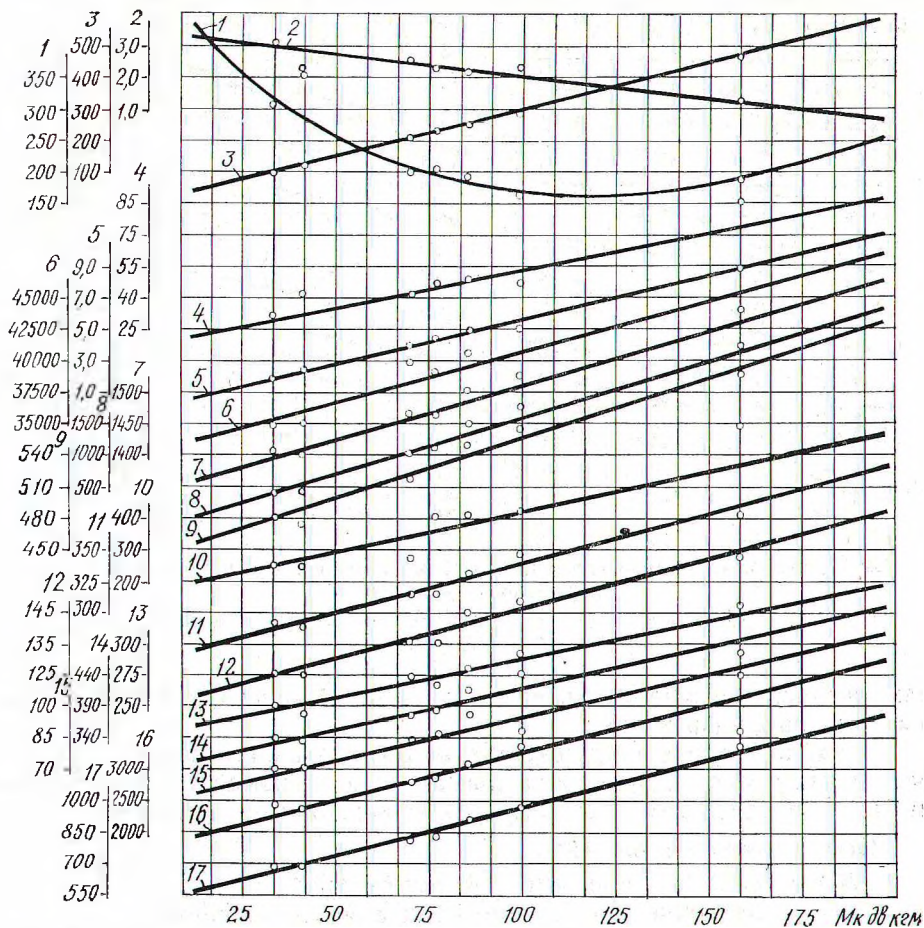


Рис. 3. Изменение параметров работы турбопоршневого дизеля при снятии нагрузочной характеристики ($n_{дв} = 2100$ об/мин; воздушный фильтр ВТИ-4):

- 1 — G_e , г/элсч.; 2 — a ; 3 — N_e , л. с.; 4 — G_T , кг/ч; 5 — P_e , кг/см²; 6 — $n_{тк}$, об/мин;
 7 — G_b , кг/ч; 8 — $P_{кз}$, мм вод. ст.; 9 — ΔP_a , мм вод. ст.; 10 — $P_{кр}$, мм вод. ст.; 11 — $P_{цикл}$, мм вод. ст.; 12 — $P_{кор}$, мм вод. ст.; 13 — $P_{подвп}$, $P_{подсз}$, $P_{подспр}$, $P_{подсл}$, мм вод. ст.;
 14 — $P_{кор.эж}$, мм вод. ст.; 15 — $P_{за эж}$, мм вод. ст.; 16 — P_{I-III} , мм вод. ст.; 17 — $P_{тл}$, мм вод. ст.

198, за II—275, в пылесборнике — 292, в корпусе эжектора — 438 мм вод. ст. В трубке отсоса пыли разрежение увеличилось с 270 до 335 мм вод. ст. Давление газовой смеси на выходе из диффузора эжектора возросло с 69 до 105 мм вод. ст. Число оборотов ротора турбокомпрессора увеличилось с 30 500 до 35 000 в минуту, т. е. на 14,75%.

Газы, выходящие из цилиндров, в начале опыта имели температу-

ру 286—352, а в конце—496—544°C; перед турбиной соответственно 319 и 487°C, после турбины 313 и 492°C.

Изменения остальных параметров работы дизеля ЯМЗ-240Н представлены на рис. 3 и 4.

Особое внимание при исследовании обращалось на температуру воздуха в трубке отсоса пыли из воздухоочистителя. Изменение температуры позволяет судить о работе эжектора, т. е. проследить, происходит ли отсос пылевоздушной смеси из пылесборника или, наоборот,

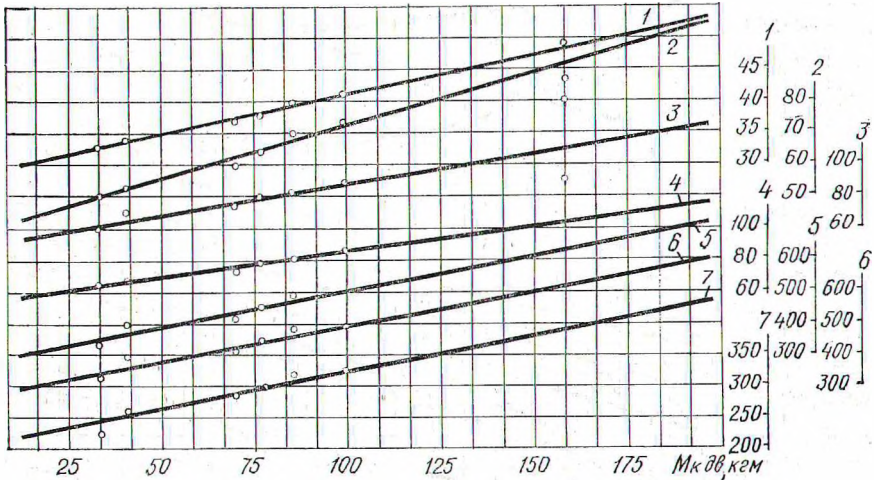


Рис. 4. Изменение температуры при снятии нагрузочной характеристики турбопоршневого двигателя:

1 — $t_{\text{возд. кал.}}$; 2 — $t_{\text{возд. компр.}}$; 3 — $t_{\text{м. дв.}}$; 4 — $t_{\text{в. дв.}}$; 5 — $t_{\text{перед. турб.}}$; 6 — $t_{\text{посл. турб.}}$; 7 — $t_{\text{Г за эж.}}$

разрежение, создаваемое двигателем на такте впуска, преобладает над эжекционным разрежением.

В табл. 1 приведены результаты исследования, полученные при различных оборотах коленвала двигателя в зависимости от сопротивления на входе в компрессор и противодействия за турбиной.

Обозначения в табл. 1:

- ΔP — разрежение на входе в компрессор;
- $P_{\text{Г}}$ — давление отработавших газов перед турбиной;
- $P_{\text{Г}}$ — давление отработавших газов на выходе из турбины;
- $t_{\text{возд. тр.}}$ — температура воздуха, отсасываемого эжектором из пылесборника ВТИ-4.

Анализ полученных данных позволяет установить, что при малых противодействиях на выхлопе, имеющих место на холостом ходу до 1000—1300 об/мин, и росте гидравлических сопротивлений на входе в компрессор с 108 до 952 мм вод. ст. создаются условия для поступления газов через эжектор в воздухоочиститель. Это приводит к снижению процентного содержания кислорода воздуха, поступающего в двигатель; высокая температура способствует выгоранию масла кассет.

При высоких значениях ΔP и $P_{\text{Г}}$ в трубопроводе, подводящем воздух к цилиндрам (наддув), создается разрежение вместо избыточного давления.

Таблица 1

Параметры работы дизеля ЯМЗ-240Н, полученные при различных оборотах двигателя

Работа, двигателя об/мин	Зависимость	№ опыта	Параметры				
			P_k	ΔP	P_r	P_T	$t_{\text{возд. тр.}}$
			мм рт. ст.				° С
1000	$P_k; t_{\text{возд. тр.}} = f(\Delta P)$	1	-143	108	485	36	103
		2	-365	303	455	32	99
		3	-575	510	455	30	83
		4	-800	694	420	28	65
1000	$P_r; t_{\text{возд. тр.}} = f(P_r)$	1	100	111	517	65	88
		2	77	125	741	286	26
		3	71	135	1180	694	25
		4	59	137	979	975	24
1500		1	80	258	816	184	47
		2	59	265	979	476	28
		3	44	272	1210	748	27
		4	32	279	1373	1084	30
2100		1	405	470	1645	407	67
		2	250	483	1795	727	44
		3	135	488	2026	1085	43
		4	53	490	2352	1600	43
1000	$P_k; P_r; t_{\text{возд. тр.}} = f(\Delta P; P_T)$	1	-160	122	757	310	35
		2	-340	400	510	34	117
		3	-130	200	803	295	39
		4	-775	803	983	496	137
2100	$P_k; P_r; t_{\text{возд. тр.}} = f(\Delta P; P_T)$	1	270	245	1618	983	40
		2	458	258	1510	140	150
		3	35	408	1170	705	51
		4	-930	952	2312	1600	150

Увеличение противодавления на выхлопе улучшает работу эжектора, исключает возможность возгорания ВТИ-4; влечет снижение n_{TK} и η_{K} .

Уменьшение ΔP способствует возрастанию P_k , но, как показывают исследования, величина P_k находится в линейной зависимости от n_{TK} . В свою очередь n_{TK} изменяется в зависимости от давления и температуры газа перед турбиной и противодавления за ней.

Выводы

1. Предложенная методика измерения может быть использована в любой лаборатории для исследования двигателей и воздухоочистителей.

2. Увеличение гидравлических сопротивлений на входе в компрессор вызывает рост эффективного удельного расхода топлива, температуры выпускаемых газов; снижается N_e , P_k , G_b , α , n_{TK} .

3. Снижение противодавления за турбиной приводит к росту n_{TK} , а следовательно, к увеличению P_k .

4. Исследуемая конструкция эжектора не обеспечивает отсос пыли из пылесборника ВТИ-4 при малых противодавлениях за турбиной.

5. Снижение гидравлических сопротивлений на входе в компрессор двигателя (удовлетворение ТУ) возможно за счет применения комбинированного воздухоочистителя с бумажным фильтрующим элементом; сопротивление чистого фильтра не должно превышать 200—250 мм вод. ст.

6. Форма пылесборника в отличие от ВТИ-4 должна способствовать концентрации пыли у пылеотсасывающего патрубка.

7. Удаление пыли из пылесборника и с поверхности бумажного фильтрующего элемента должно быть автоматизировано и производиться периодически с помощью сжатого воздуха от компрессора тормозной системы машины или другого источника.

8. Все воздушные фильтры должны быть оборудованы специальными сигнализаторами разрежения, которые должны исключать возможность эксплуатации двигателя при сопротивлениях воздушного тракта, выше допустимого. В случае превышения сопротивления сигнализатор должен обеспечить выдачу команды на световой или звуковой сигнал, а в некоторых случаях автоматически выключать двигатель. Из-за отсутствия сигнализатора в комплекте воздушного фильтра в настоящее время срок между техническими обслуживаниями зависит от целого ряда факторов, например от условий дороги, карьера, времени года, от сознания водителя и т. п., т. е. нет объективной оценки качества воздуха, поступающего в двигатель.

Литература

[1] Технические условия (ТУ-37-001-043-70) на двигатель ЯМЗ-240Н. [2] Д. А. Портнов. Быстроходные турбопоршневые двигатели с воспламенением от сжатия. М., 1963. [3] М. С. Корнев. Автомобильные воздухоочистители. М., 1961.