

## ДОВОДКА РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ 8ДМ-21ЭЛ2М С ТУРБОКОМПРЕССОРАМИ TCR14

*Д.С. Шестаков, к.т.н., доц., И.Е. Пронин, начальник бюро  
«Уральский дизель-моторный завод»*

Для расширения списка альтернативных поставщиков агрегатов турбонаддува дизелей 8ДМ-21ЭЛ2М на ООО «УДМЗ» была выполнена ОКР по установке турбокомпрессоров TCR14 чешского производителя «PBS Turbo». Для получения оптимальных показателей рабочего процесса дизеля в турбокомпрессоре TCR14 устанавливались два варианта альтернативных сопловых аппаратов и диффузора. Расчетно-экспериментальным методом построены гидравлические характеристики дизеля с различными вариантами проточных частей турбокомпрессора. Оптимальными проточными частями TCR14 для 8ДМ-21ЭЛ2М выбраны сопловой аппарат TD4721 (с площадью 36,8 см<sup>2</sup>) и диффузор VD 100305 (с площадью 21,8 см<sup>2</sup>).

В современных транспортных дизелях внедорожного применения форсирование рабочего процесса осуществляется наддувом. Турбопоршневые двигатели представляют собой класс наиболее экономичных машин для силовых установок различного применения. Наддув стал главным средством повышения среднего эффективного давления, экономичности, улучшения динамики, повышения литровой мощности и снижения удельного веса и металлоемкости конструкции. Величина давления наддува зависит от ряда параметров рабочего процесса, назначения и ресурса двигателя.

ООО «Уральский дизель-моторный завод» (Екатеринбург) с 2006 года выпускает двигатели типа ДМ21/21 для маневровых и маневровывозных тепловозов. При модернизации дизеля 8ДМ-21ЭЛ2М в составе дизель-генератора ДГ-882ЛМ (силовая установка тепловозов ТЭМ9 и ТЭМ14) в 2012 г. была выполнена ОКР по замене одного турбокомпрессора ТК18В-57 производства ОАО «СКБТ» (г. Пенза) на два ТК TPS48D-01 швейцарской фирмы АВВ с меньшим диаметром колеса компрессора, имеющих лучшую динамику разгона, большую надежность и соответствующих требованиям технических условий. В 2014 г. в рамках программы импортозамещения [2] возникла необходимость вернуться к комплектации двигателей ТК российского производства, но с сохранением размерности



их колес и рабочих параметров. Для решения этой задачи в АО «НПО Турботехника» были разработаны турбокомпрессоры ТКР180, обеспечивающие полную взаимозаменяемость с TPS48D-01 при установке их на ДГ-882ЛМ. Параллельно с этим для дальнейшего расширения списка альтернативных агрегатов турбонаддува была выполнена ОКР по установке ТК TCR14 чешского производителя «PBS Turbo». Чешские ТК также обеспечивали взаимозаменяемость с ТК TPS48D-01 и ТКР180 с той лишь разницей, что требовали дополнительного охлаждения корпуса подшипников из системы охлаждения дизеля.

Все вышеперечисленные турбокомпрессоры, включая TCR14, должны обеспечить рабочие параметры на всех режимах работы дизель-генератора ДГ-882ЛМ, а также соответствовать всем классическим требованиям [3–5], предъявляемым к ТК транспортного дизеля.



**Рис. 1.** Установка дизеля 8ДМ-21ЭЛ2М с турбокомпрессорами TCR14 на испытательном стенде ООО «УДМЗ»

Варианты сочетаний проточных частей при опытно-доводочных испытаниях ТК TCR14 в составе дизеля 8ДМ-21ЭЛ2М

№ варианта	Сопловой аппарат		Лопаточный диффузор	
	Обозначение	Площадь, см <sup>2</sup>	Обозначение	Площадь, см <sup>2</sup>
1	TD 4720	38,5	VD 100303	23,7
2	TD 4721	36,8	VD 100303	23,7
3	TD 4721	36,8	VD 100305	21,8

альтернативных проточных частей турбокомпрессора TCR14, а именно: два диффузора и два сопловых аппарата (табл. 1). Варианты сочетаний альтернативных компонентов приведены в табл. 2.

Вариативность проточных частей ТК при доводочных испытаниях на двигателе позволяет подобрать оптимальный режим совместной работы дизеля и ТК, обеспечивающий требуемое изменение удельного расхода топлива при работе по нагрузочной характеристике.

Результаты измерений параметров двигателя с их расшифровкой при установке первого варианта проточных частей занесены в табл. 3, результаты расчета гидравлической характеристики ТК, соответствующей данным измерений, — в табл. 4. На рис. 3 приведена фактическая гидравлическая характеристика дизеля 8ДМ-21ЭЛ2М с исходным вариантом проточных частей турбокомпрессора TCR14.

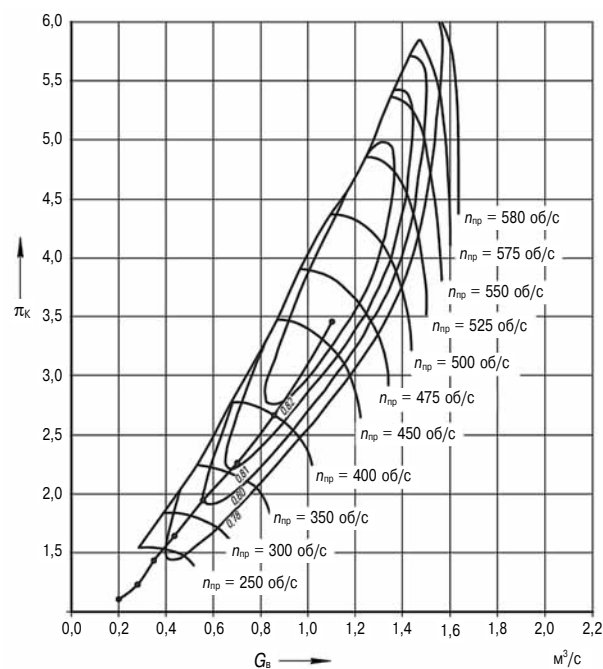


Рис. 3. Гидравлическая характеристика дизеля 8ДМ-21ЭЛ2М с ТК TCR14 с исходными проточными частями VD 100303 ( $S_{\text{диф}} = 23,7 \text{ см}^2$ ) и TD 4720 ( $S_{\text{СА}} = 38,5 \text{ см}^2$ )

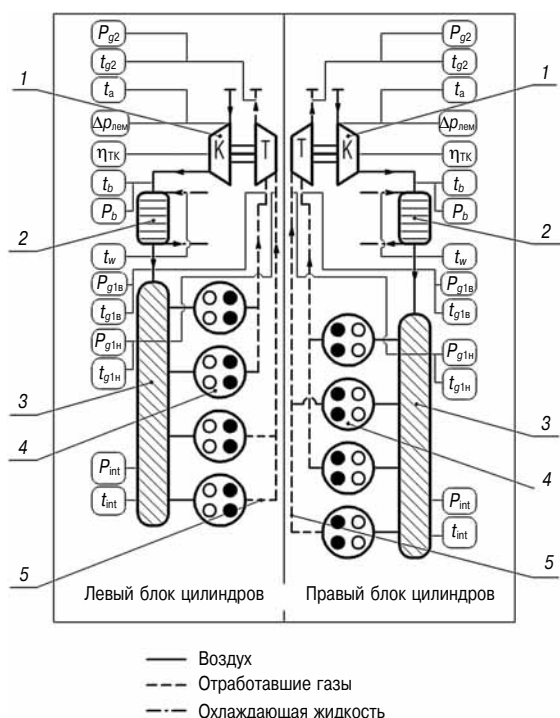


Рис. 2. Схема установки датчиков на дизеле 8ДМ-21ЭЛ2М с турбокомпрессорами ТКР180:

1 — турбокомпрессор; 2 — охладитель наддувочного воздуха; 3 — блок цилиндров; 4 — цилиндр; 5 — выпускной коллектор

Опытно-доводочные испытания TCR14 в составе дизеля 8ДМ-21ЭЛ2М (8ЧН21/21) (рис. 1), как и прочих ТК, проводились по методике, разработанной на основании рекомендаций источников [6–7], с учетом многолетнего опыта предприятия.

При испытаниях фиксировались рабочие параметры двигателя, а также температура и давление воздуха и газа в контрольных точках впускного и выпускного коллекторов и турбокомпрессора (рис. 2).

Кроме штатных проточных частей турбокомпрессора (диффузора VD 100303 и соплового аппарата TD 4720) компанией «PBS Turbo» были предоставлены дополнительно четыре варианта

Таблица 1

Обозначение и площадь проточных частей ТК TCR14

Наименование	Площадь, см <sup>2</sup>	Примечание
<b>Диффузор</b>		
VD 100303	23,7	Основной
VD 100305	21,8	
VD 100323	25,9	
<b>Сопловой аппарат</b>		
TD 4720	38,5	Основной
TD 4719	40,4	
TD 4721	36,8	

**Результаты измерений параметров дизеля 8ДМ-21ЭЛ2М с турбокомпрессорами TCR14 с исходными проточными частями VD 100303 и TD 4720 ( $S_{\text{диф}} = 23,7 \text{ см}^2$ ,  $S_{\text{са}} = 38,5 \text{ см}^2$  – вариант 1)**

Величина	Обозначение	Ед. изм.	1	2	3	4	5	6	7	8	
Частота вращения коленчатого вала	$n$	об/мин	520	660	800	940	1080	1220	1360	1500	
Сила торможения	$P$	кгс	284,1	337	407	472,4	509,2	551	575	592,1	
Измерительный вес топлива (разновес)	$G$	кг	2	2	2	2	2	2	2	2	
Время расходования топлива	$\tau$	с	194,5	132	90,5	68,4	56,3	47,4	40,9	35,5	
Частота вращения ротора ТК	левый	$n_{\text{ТК лев}}$	10050	13400	18400	23900	28200	32900	39700	40700	
	правый	$n_{\text{ТК прав}}$	9850	13100	18500	24200	28400	33000	37400	42000	
Барометрическое давление	$p_a$	мм.рт.ст.	744	744	744	744	744	744	744	744	
Перепад давления на лемнискате	1ТК	$\Delta p_{\text{лем лев}}$	мм.вод.ст.	19	33	62	96	150	248	378	573
	2ТК	$\Delta p_{\text{лем прав}}$	мм.вод.ст.	20	32	59	95	151	248	405	647
Давление газов перед турбиной	1ТК левый	$p_{g1 \text{ лев низ}}$	кгс/см <sup>2</sup>	0,06	0,1	0,17	0,3	0,46	0,67	0,9	1,23
	1ТК правый	$p_{g1 \text{ лев верх}}$	кгс/см <sup>2</sup>	0,06	0,09	0,15	0,28	0,44	0,66	0,92	1,23
	2ТК левый	$p_{g1 \text{ прав низ}}$	кгс/см <sup>2</sup>	0,05	0,09	0,16	0,3	0,44	0,65	0,95	1,35
	2ТК правый	$p_{g1 \text{ прав верх}}$	кгс/см <sup>2</sup>	0,04	0,07	0,15	0,29	0,44	0,66	0,97	1,34
Давление газов за турбиной	1ТК	$p_{g2 \text{ лев}}$	мм.вод.ст.	7	17	17	36	69	126	187	265
	2ТК	$p_{g2 \text{ прав}}$	мм.вод.ст.	7	7	-2	72	86	110	122	179
Давление воздуха за компрессором	1ТК	$p_b \text{ лев}$	кгс/см <sup>2</sup>	0,06	0,11	0,21	0,41	0,62	0,9	1,19	1,54
	2ТК	$p_b \text{ прав}$	кгс/см <sup>2</sup>	0,06	0,1	0,22	0,44	0,64	0,92	1,27	1,68
Давление воздуха во впускных коллекторах	левый	$p_{\text{int лев}}$	кгс/см <sup>2</sup>	0,06	0,11	0,21	0,41	0,62	0,89	1,17	1,53
	правый	$p_{\text{int прав}}$	кгс/см <sup>2</sup>	0,06	0,1	0,22	0,44	0,63	0,91	1,25	1,65
Температура воздуха на входе в ТК	1ТК	$t_a \text{ лев}$	°С	40,3	42	43,4	43,4	42,8	42,2	40,8	40,2
	2ТК	$t_a \text{ прав}$	°С	42,5	45,1	45,8	45,7	44,8	44,2	42,8	41,3
Температура воды на входе в ОНВ	—	$t_w$	°С	65	65	65	65	65	65	65	65
Температура воздуха за компрессором	1ТК	$t_b \text{ лев}$	°С	55	61,7	73,8	91	107,5	127,2	144,3	164,7
	2ТК	$t_b \text{ прав}$	°С	61,2	68,6	91,3	99,3	113,2	131,6	152,7	176,6
Температура воздуха во впускных коллекторах	левый	$t_{\text{int лев}}$	°С	62,4	63,7	65,7	66,5	67,7	72,7	74,7	80,5
	правый	$t_{\text{int прав}}$	°С	62,8	64,5	66,8	67,9	69,4	73,8	77,5	84,7
Температура газов перед турбиной	1ТК левая	$t_{g1 \text{ лев низ}}$	°С	404	459	518	532	534	522	519	522
	1ТК правая	$t_{g1 \text{ лев верх}}$	°С	372	446	532	542	535	530	512	503
	2ТК левая	$t_{g1 \text{ прав низ}}$	°С	420	478	546	543	530	521	499	511
	2ТК правая	$t_{g1 \text{ прав верх}}$	°С	365	454	525	548	537	524	516	494
Температура газов за турбиной	1ТК	$t_{g2 \text{ лев}}$	°С	270	300	328	333	338	325	309	301
	2ТК	$t_{g2 \text{ прав}}$	°С	268	297	326	339	334	320	301	293
Давление масла на входе в ТК	левая	$p_m \text{ лев}$	кгс/см <sup>2</sup>	0,8	1,2	1,7	2,1	2,3	2,4	2,4	2,4
	правая	$p_m \text{ прав}$	кгс/см <sup>2</sup>	0,9	1,4	2,1	2,6	3	3,2	3,2	3,2

На режимах работы дизеля, соответствующих 2–4-й позициям контроллера (см. табл. 4) слышались глухие стуки и шумы в левом впускном коллекторе, вызванные пульсациями давления воздуха во впускной системе (проточная часть компрессора, патрубки, охладитель наддувочного воздуха, впускной коллектор, канал в головке цилиндра), возникающими, вероятно, в результате закрытия впускных клапанов. Так как давление наддува на этих режимах работы незначительно, и остальные параметры не имеют отклонений, то на работу дизеля отмеченный эффект влияния не оказывает.

В соответствии с данными рис. 3 и табл. 3 (позиции 7 и 8) имеется возможность сдвига характеристики в сторону более высоких КПД компрессора, а запас по помпажу на 5-й и 6-й позициях достаточно большой ( $\approx 30\%$ ), то было принято решение о замене сопловых аппаратов с TD 4720 (площадью  $38,5 \text{ см}^2$ ) на сопловые аппараты TD 4721 (с меньшей площадью  $36,8 \text{ см}^2$ ). Замена выполнена с целью сдвига характеристики дизеля в сторону максимальных КПД компрессора и дальнейшего снижения удельного расхода топлива. Результаты испытаний показаны на рис. 4.

Результаты расчетов гидравлической характеристики турбокомпрессоров TCR14 с исходными проточными частями ( $S_{\text{диф}} = 23,7 \text{ см}^2$ ,  $S_{\text{СА}} = 38,5 \text{ см}^2$  — вариант 1)

Величина	Обозначение	Ед. изм.	1	2	3	4	5	6	7	8	
Мощность	$P_e$	кВт	155	233	341	465	576	704	819	930	
		л.с.	210,4	316,8	463,7	632,4	783,2	957,4	1113,7	1264,9	
Приведенная мощность	$P_{e \text{ пр}}$	кВт	159,1	243,9	357,5	487,5	602,9	737,8	845,4	960,5	
		л.с.	216,36	331,70	486,18	662,99	819,89	1003,37	1149,76	1306,33	
Часовой расход топлива	$B$	кг/ч	37,02	54,55	79,56	105,26	127,89	151,90	176,04	202,82	
Удельный расход топлива	$g_e$	г/кВт·ч	239,28	234,18	233,33	226,37	222,07	215,78	214,97	218,07	
		г/лс·ч	175,94	172,19	171,57	166,45	163,28	158,66	158,06	160,34	
Приведенный удельный эффективный расход топлива	$g_{e \text{ пр}}$	г/кВт·ч	232,69	223,64	222,55	215,93	212,13	205,89	208,23	211,15	
		г/лс·ч	171,10	164,44	163,64	158,77	155,98	151,39	153,11	155,26	
Расход воздуха физический	1ТК	$G_{\text{в лев}}$	кг/с	0,173	0,228	0,311	0,386	0,482	0,617	0,758	1,137
	2ТК	$G_{\text{в прав}}$	кг/с	0,177	0,223	0,302	0,383	0,482	0,615	0,781	1,189
Расход воздуха приведенный	1ТК	$G_{\text{в пр лев}}$	кг/с	0,183	0,242	0,332	0,414	0,518	0,670	0,832	1,318
	2ТК	$G_{\text{в пр прав}}$	кг/с	0,188	0,238	0,324	0,411	0,520	0,670	0,862	1,396
	1ТК	$G_{\text{в пр лев}}$	м <sup>3</sup> /с	0,153	0,202	0,277	0,345	0,432	0,558	0,693	1,098
	2ТК	$G_{\text{в пр прав}}$	м <sup>3</sup> /с	0,157	0,198	0,270	0,343	0,433	0,558	0,718	1,164
Степень повышения давления в компрессоре	1ТК	$\pi_{\text{К лев}}$	—	1,06	1,11	1,22	1,42	1,64	1,94	2,26	3,43
	2ТК	$\pi_{\text{К прав}}$	—	1,06	1,10	1,22	1,45	1,66	1,96	2,35	3,60
Степень повышения давления в турбине	1ТК	$\pi_{\text{Т лев}}$	—	1,06	1,10	1,17	1,30	1,47	1,70	1,97	2,35
	2ТК	$\pi_{\text{Т прав}}$	—	1,05	1,08	1,16	1,30	1,46	1,69	1,59	2,49
КПД компрессора	1ТК	$\eta_{\text{К лев}}$	%	32,44	43,82	52,76	61,73	65,07	67,78	69,76	71,34
	2ТК	$\eta_{\text{К прав}}$	%	25,72	33,90	36,99	58,65	63,59	67,47	69,58	70,55
Приведенная частота вращения ротора ТК	1ТК	$n_{\text{пр лев}}$	об/мин	9832	13074	17913	23267	27479	32089	38808	39824
	2ТК	$n_{\text{пр прав}}$	об/мин	9603	12719	17942	23747	27587	32085	36444	41024

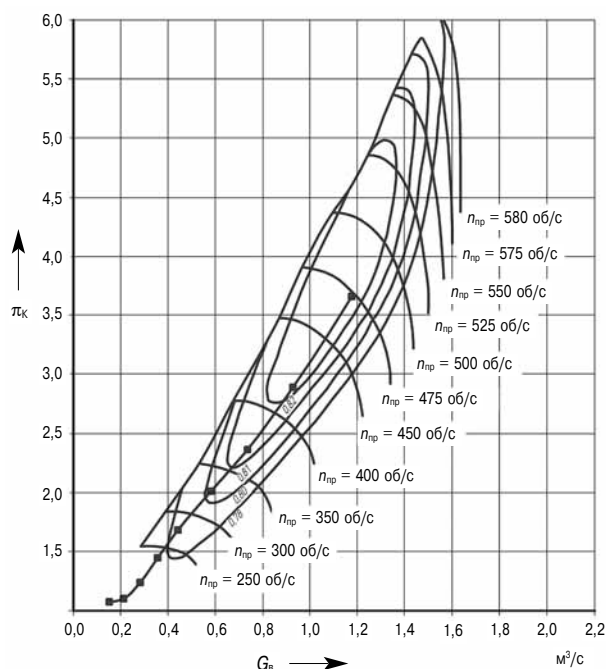


Рис. 4. Гидравлическая характеристика дизеля 8ДМ-21ЭЛ2М с ТК TCR14 с вариантом 2 (см. табл. 2) проточных частей VD 100303 ( $S_{\text{диф}} = 23,7 \text{ см}^2$ ) и TD TD 4721 ( $S_{\text{СА}} = 36,8 \text{ см}^2$ )

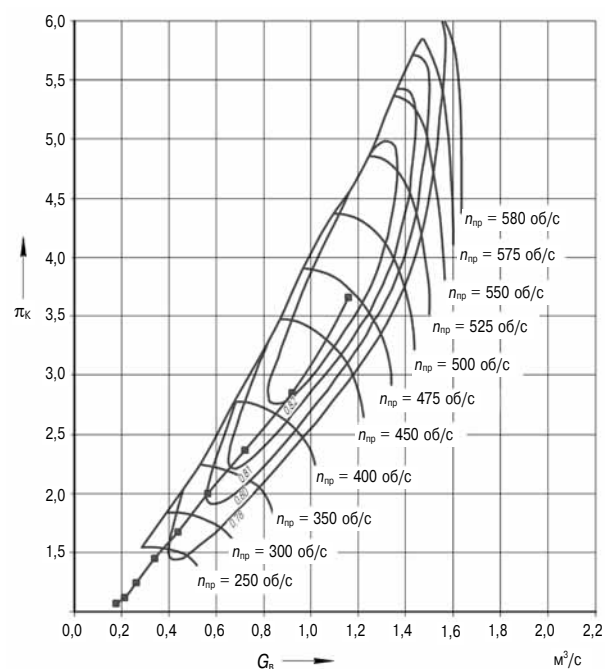


Рис. 5. Гидравлическая характеристика дизеля 8ДМ-21ЭЛ2М с ТК TCR14 с вариантом 3 (см. табл. 2) проточных частей VD 100305 ( $S_{\text{диф}} = 21,8 \text{ см}^2$ ) и TD TD 4721 ( $S_{\text{СА}} = 36,8 \text{ см}^2$ )

Таблица 7

**Результаты проверки на устойчивость к помпажу дизеля 8ДМ-21ЭЛ2М с турбокомпрессорами TCR14 с третьим вариантом проточными частями VD 100305 и TD 4721 ( $S_{\text{диф}} = 21,8 \text{ см}^2$ ,  $S_{\text{са}} = 36,8 \text{ см}^2$ )**

Величина	Обозначение	Ед. изм.	3	4	5	6	7	8	9
Частота вращения коленчатого вала	$n$	об/мин	800	940	1080	1220	1360	1500	1500
Мощность	$P_e$	кВт	341	465	576	704	819	930	1176
		л.с.	464	632	783	557	1113	1265	1600
Крутящий момент	$P$	Нм	4070	4724	5092	5510	5750	5921	7492
Частота вращения при попытке уловить помпаж	$n_{\text{помп}}$	об/мин	—	900	915	935	970	1000*	1200*
$(n - n_{\text{помп}})100/n_{\text{помп}}$	—	—	—	4,44	18	30,5	40,2	50	25

\* Помпаж не достигнут

Таблица 9

**Сравнение приведенных удельных эффективных расходов топлива (г/кВт·ч) дизелей 8ДМ-21ЭЛ2М с турбокомпрессорами TCR14 с различными вариантами проточных частей**

ТК/позиция	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>TCR14</b> VD 100303 и TD 4720 (первый вариант)	232,69	223,64	222,55	215,93	212,13	205,89	208,23	211,15	208,83
<b>TCR14</b> VD 100303 и TD 4721 (второй вариант)	242,15	232,40	228,18	220,59	211,84	210,21	207,04	211,34	208,47
<b>TCR14</b> VD 100305 и TD 4721 (третий вариант)	238,28	229,52	224,53	218,71	211,05	205,98	208,24	210,96	207,97

В результате замены соплового аппарата удельный эффективный расход топлива снизился незначительно, на величину 1 г/кВт·ч, при этом признаки помпажа (глухой шум и хлопки) у левого турбокомпрессора появились уже на 4-й позиции. Для ухода от помпажа заменили диффузоры VD100303 (23,7 см<sup>2</sup>) на диффузоры VD100305 с меньшей площадью (21,8 см<sup>2</sup> — вариант 3, табл. 2). Результаты испытаний показаны на рис. 5. Рабочая характеристика совместной работы компрессора и двигателя при этом изменилась незначительно.

При испытаниях проточной части ТК по варианту 3 признаки помпажа с 4-й позиции исчезли, однако его слабое проявление появлялось на 3-й, 2-й и 1-й позициях. Проверка дизеля на устойчивость к помпажу за счет уменьшения частоты вращения дизеля с сохранением нагрузки на каждой позиции показала достаточный запас, начиная с 5-й позиции (более 15 %), который возрастает с увеличением мощности.

В результате проведенных опытно-доводочных испытаний установлено:

1. Турбокомпрессор TCR14 с различными проточными частями обеспечивает требуемое воздуходобывание дизеля 8ДМ-21ЭЛ2М в составе дизель-генератора ДГ-882ЛМ при установке на тепловозах ТЭМ9 и ТЭМ14.

2. Оптимальными проточными частями ТК при этом являются сопловой аппарат TD4721 и диффузор VD 100305 (вариант 3), так как на основном режиме работы (позиция 6) приведенный удельный эффективный расход топлива минимален и отсутствует помпаж.

3. Рабочие параметры дизеля — температура отработавших газов и частота вращения ротора турбокомпрессора находятся в допустимых пределах: 650 °С и 58 700 об/мин соответственно.

4. Удельный эффективный расход топлива дизеля с турбокомпрессорами TPS48-D01 и TCR14 на 3–8-й позициях практически равный, а на 1-й и 2-й позициях с турбокомпрессором TCR14 — ниже на 7 г/кВт·ч.

5. Дизель-генератор ДГ-882ЛМ с турбокомпрессорами TCR14 соответствует требованиям технических условий изготовителя.

**Литература**

1. Тепловозные двигатели внутреннего сгорания: Учебник для вузов/ А.Э. Симсон, А.З. Хомич, А.А. Куриц и др. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1987. — 536 с.
2. <http://www.metallinfo.ru/ru/news/77953>
3. Турбонаддув высокооборотных дизелей / Алексеев В.П. [и др.]. М.: Машиностроение, 1976. — 288 с.
4. Автомобильные двигатели с турбонаддувом / Н.С. Ханин [и др.]. М.: Машиностроение, 1991. — 336 с.: ил.
5. Циннер К. Наддув двигателей внутреннего сгорания — Aufladung von Verbrennungsmotoren: перевод с немецкого / К. Циннер; под ред. док. техн. наук Н.Н. Иванченко. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. — 264 с.
6. Турбокомпрессоры для наддува дизелей: справочное пособие / Б.П. Байков, В.Т. Бордуков, П.В. Иванов, Р.С. Дейч. Л.: Машиностроение, 1975. — 200 с.
7. Агрегаты воздуходобывания комбинированных двигателей / Д.А. Дехович [и др.] М.: Машиностроение, 1973. — 296 с.