

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО  
ТРАНСПОРТА» (АО «ВНИИЖТ»)



На правах рукописи

**Силюта Анатолий Геннадьевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ  
ТЕПЛОВОЗА ПУТЕМ РАСШИРЕНИЯ ОБЛАСТИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ  
ДИЗЕЛЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ  
УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.22.07 - Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и  
электрификация

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Коссов Евгений Евгеньевич

Москва – 2019

## Оглавление

Введение	4
1 Анализ характеристик дизелей и направлений по их совершенствованию	10
1.1 Характеристики дизелей современных тепловозов	10
1.2 Анализ управляемых систем наддува транспортных дизелей	19
1.3 Выводы по разделу 1	24
2 Моделирование поездной работы тепловоза при различных атмосферных условиях, способах управления силовой установкой	26
2.1 Анализ методов математического моделирования	26
2.2 Математическая модель рабочих процессов совместной работы поршневой части дизеля, оборудованного устройствами перепуска рабочего тела, с лопаточными машинами	28
2.3 Оценка адекватности моделирования совместной работы поршневой части дизеля, оборудованного устройствами перепуска рабочего тела, с лопаточными машинами	37
2.4 Имитационная модель поездной работы магистрального тепловоза	40
2.5 Выводы по разделу 2	47
3 Исследование эффективности электронной системы управления	48
3.1 Численное исследование работы дизелей типа 16ЧН26/26 с различными способами управления силовой установкой на эксплуатационных режимах	48

3.2	Результаты моделирования поездной работы тепловозов, оборудованных электронной системой управления силовой установкой	60
3.3	Анализ результатов эксплуатационных испытаний тепловозов, оборудованных электронными системами управления силовой установкой	63
3.4	Выводы по разделу 3	74
4	Технико-экономическая оценка эффективности применения электронной системы управления силовой установкой	79
4.1	Общие положения	79
4.2	Исходные данные для расчета	81
4.3	Методика расчета технико-экономической эффективности	81
4.4	Методика расчета эксплуатационных расходов	86
4.5	Результаты расчета экономической эффективности	90
4.6	Выводы по разделу 4	93
	Заключение	95
	Список литературы	96
	Приложения	107

## Введение

### Актуальность темы исследования

Среднее эффективное давление современных высокофорсированных дизелей тепловозов достигает 1,8-2,0 МПа. Это позволило увеличить секционную мощность тепловозов до 3500-4000 кВт и КПД тепловоза до 33-35 %. При этом скоростные характеристики дизеля стали более нелинейными, возросла вероятность попадания турбокомпрессоров в зону неустойчивой работы. Изменение скоростной характеристики дизеля при повышении форсирования приводит к относительному снижению эффективной мощности на частичных нагрузках и малоэффективному использованию оборудования на низких и средних частотах вращения коленчатого вала дизеля, к снижению КПД тепловоза при работе на этих режимах.

Можно перенастроить турбокомпрессор так, чтобы повысить производительность на неноминальных режимах. Это позволит повысить топливную экономичность двигателя на частичных нагрузках. Однако при нагрузках, составляющих более 70 % от номинальной мощности, и низких температурах наружного воздуха давление наддувочного воздуха будет чрезмерно повышено и потребуются меры по снижению максимального давления сгорания. Для поддержания давления наддува в установленных границах на тепловозах применяют системы перепуска части наддувочного воздуха на вход в турбину или за турбину. Опыт эксплуатации систем перепуска рабочего тела показал, что принципиально эта задача решается. На практике система перепуска работает сравнительно небольшое время работы (для умеренного типа климата не более 0,2 % от общего времени работы), имеет сложную конструкцию, отказ которой может привести к повреждению двигателя из-за попадания выхлопных газов после турбины в охладитель наддувочного воздуха.

Другим способом решения проблемы может стать оперативное изменение характеристик двигателей тепловозов с высоким средним эффективным давлением

путем совершенствования систем управления частотой вращения коленчатого вала и подачей топлива.

В диссертации рассмотрены теоретические и экспериментальные исследования показателей работы силовой установки тепловоза при расширении области режимов работы дизеля и реализации защиты турбокомпрессора и дизеля в экстремальных условиях при применении электронной системы управления.

### **Степень разработанности темы**

Исследованию повышения эффективности комбинированных двигателей посвящены работы Мазинга Е.К., Стечкина Б.С., Орлина А.С., Глаголева Н.М., Портнова Д.А., Луканина В.Н., Мизернюка Г.Н., Крутова В.И., Деховича Д.А., Шепелева В.А., Володина А.И., Симпсона А.Э., Эпштейна А.С., Коссова Е.Е., Рыжова В.А., Васильева В.Н., Сухопарова С.И., Балабина В.Н., Михаилиди К.Г., Кулешова А.С., Фурмана В.В., Бабела М., Савастенко А.А. и др.

**Объект исследования** – силовая установка магистрального тепловоза.

**Предмет исследования** – показатели работы силовой установки магистрального тепловоза при выполнении поездной операции в широком диапазоне изменения атмосферных условий.

### **Цель и задачи**

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности работы силовой установки тепловоза путем расширения области режимов работы дизеля при применении электронного управления силовой установкой.

**Для достижения поставленной в работе цели** решены следующие задачи:

1. Анализ рабочих процессов совместной работы поршневой части дизеля с агрегатами наддува при применении перепуска рабочего тела.
2. Моделирование показателей работы тепловозной дизель-генераторной установки при различных атмосферных условиях.
3. Анализ влияния способов управления системой наддува на показатели работы тепловоза при выполнении поездной операции.

4. Экспериментальная проверка эффективности предлагаемых способов управления силовой установкой.

### **Научная новизна**

1. Разработана уточненная математическая модель рабочих процессов совместной работы поршневой части дизеля с агрегатами наддува, отличие которой от существующих моделей состоит в том, что при дополнении расчетной схемы устройства перепуска рабочего тела и детализации процессов наполнения, продувки и выпуска при определении расхода рабочего тела в качестве условия окончания цикла расчета автором предложено использовать равенство заданного и фактического суммарного массового расхода рабочего тела дизеля вместо равенства единице произведений перепадов давлений в характерных сечениях газоздушного тракта.

2. Проведенный комплекс расчетно-экспериментальных исследований показал, что при регулировании тепловозной характеристики и реализации электронного управления высокофорсированным дизелем обеспечиваются требуемые показатели работы силовой установки, регламентируемые техническими условиями на поставку, во всем диапазоне изменения атмосферных условий без применения систем перепуска рабочего тела.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Результаты проведенных расчетно-экспериментальных исследований показали, что регулирование тепловозной характеристики и реализация алгоритмических защит позволяет упростить комплектацию дизель-генераторной установки путем исключения системы перепуска рабочего тела без ухудшения топливной экономичности.

2. Внесено изменение в ТУ 3129-063-24428398-2014 Электронная система управления впрыском топлива ЭСУВТ.03-16-00, которое исключает установку системы перепуска рабочего тела для регулирования наддува высокофорсированных дизелей.

3. Предложенные способы управления силовой установкой реализованы на 10 секциях тепловоза серии 2ТЭ116, эксплуатирующихся в грузовом движении на Приволжской железной дороге- филиал ОАО «РЖД» с 2017 г.

### **Методология и методы исследований**

При решении поставленных задач в диссертации применены обобщение и анализ опубликованных отечественных и зарубежных материалов, применены методы расчета показателей работы комбинированных двигателей, методы тяговых расчетов. Результаты теоретических исследований сопоставлялись с результатами испытаний силовой установки тепловоза на контрольных реостатных испытаниях, полученных автором.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Математическая модель определения показателей работы силовой установки магистрального локомотива при выполнении поездной операции, совмещающая модель движения поезда и модель рабочих процессов совместной работы поршневой части дизеля с агрегатами наддува в широком диапазоне изменения наружных условий.
2. Обеспечение устойчивой работы силовой установки средствами электронного управления и реализацией алгоритмических защит двигателя и турбокомпрессора без установки систем перепуска рабочего тела.

### **Степень достоверности результатов**

Подтверждается приемлемостью допущений, принятых при разработке математической модели, которая определялась сравнением основных характеристик дизеля, полученных расчетными и экспериментальными методами. При моделировании получено удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных, при этом максимальное отклонение мощности и расхода топлива составило не более 1,5 %.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- IV научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» проводимой в ФГБОУ ВО «Московский государственный университет путей сообщения (МГУПС(МИИТ))» в 2013 г.;

- научно-практической конференции «Неделя науки», проводимой в ФГБОУ ВО «Московский государственный университет путей сообщения (МГУПС(МИИТ))» в 2014 г.;

- IX международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона», проводимой в ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС)» в 2018 г.;

- всероссийской научно-практической конференции «ОБРАЗОВАНИЕ-НАУКА-ПРОИЗВОДСТВО», проводимой в «Забайкальский институт железнодорожного транспорта» - филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС)» в 2018 г.

Диссертационная работа обсуждалась на заседаниях кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» (с 2014 г. кафедра «Электропоезда и локомотивы») ФГБОУ ВО «Московский государственный университет путей сообщения (МГУПС(МИИТ))» в 2013-2015 гг., ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)» в 2017-2018 гг., на заседаниях кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» в 2019 г., а также на расширенных заседаниях Научно-технического совета отделения «Тяговый подвижной состав» АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ») в 2015-2018 гг.

### **Реализация и внедрение результатов работы**

Результаты исследований использованы при выполнении договора № 1045/13/1124 от 15.11.2013г. «Проведение испытаний электронных систем управления подачей топлива, наддувом и нагрузкой дизель-генератора тепловоза 2ТЭ116 с целью повышения его топливной экономичности» (Шифр 3.090), а также внедрены и используются в ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта



(МИИТ)» на кафедре «Электропоезда и локомотивы» при подготовке студентов очной формы обучения по специальности 23.05.03 «Подвижной состав железных дорог». Достоверность полученных результатов исследования подтверждается актом внедрения результатов диссертационной работы ООО «СКБТ». Электронная система управления двигателем, реализующая разработанные алгоритмы, установлена и успешно эксплуатируется с 2017 г. на 10 секциях тепловоза серии 2ТЭ116.

### **Публикации**

По результатам проведенных исследований опубликовано 9 научных трудов, в том числе три статьи в журналах из перечня рецензируемых изданий ВАК при Минобрнауки России: «Наука и техника транспорта», «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта», «Вестник транспорта Поволжья» и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения с основными результатами и выводами, списка литературы из 109 наименований, пяти приложений и содержит 95 страниц основного текста, 22 рисунка и 18 таблиц.

## 1 Анализ характеристик дизелей и направлений их совершенствования

### 1.1 Характеристики дизелей современных тепловозов

На железнодорожном транспорте в качестве силовых установок автономных локомотивов традиционно используются дизельные двигатели внутреннего сгорания (ДВС). Силовые установки автономных локомотивов принадлежат к классу среднеоборотных и высокооборотных двигателей и соответствуют общим тенденциям развития мирового двигателестроения. Характерными особенностями работы тепловозных дизельных двигателей являются:

- ограниченные габаритные и массовые характеристики, обусловленные размерами кузова и допустимой осевой нагрузкой на железнодорожный путь;
- частая смена режимов работы, сопровождающаяся переходными неустановившимися процессами;
- значительное время работы на холостом ходу (до 80-90 % от общего времени работы) и малых нагрузках [28, 29];
- высокая степень унификации деталей и узлов одинаковой конструкции для двигателей одного мощностного ряда.

В таблицах 1-6 представлены характеристики современных тепловозных дизелей наиболее известных зарубежных и отечественных фирм, сгруппированных по мощностным рядам и применению на магистральных или маневровых тепловозах. Продукцию дизелестроения зарубежных фирм можно условно отнести либо к Американской (компании General Motors (GM) [10], General Electric (GE) [11], Caterpillar (CAT) [12], Cummins [9]), либо к Европейской школам (компании MAN [14], MTU [13], Semt Pielstik [1]). Отечественное дизелестроение для нужд железнодорожного транспорта

Таблица 1 - Тепловозные дизельные двигатели мощностью 500 кВт

№ п/п	Параметр	Размерность	Россия		США		Германия	
			Завод им. Маминых	Звезда	Cummins	CAT	MAN	MTU
1	Марка дизеля	-	211ДЗ	M721	QSK19	3406E	D2842, L6607	396
2	Тип по ГОСТ 10150-88	-	6ЧН21/21	6ЧН18/20	6ЧН15,7/15,9	16ЧН13,7/16,5	12ЧН12,8/14,2	8ЧН16,5/18,5
3	Мощность	кВт	552	550	522	429	500	500
4	Номинальная частота вращения коленчатого вала	мин <sup>-1</sup>	1400	1600	2100	2100	2100	2100
5	Удельный расход топлива по ГОСТ 22602-91 (UIC623-II)	г/кВт·ч	214	216	221	-	200	210
6	Расход масла на угар	г/кВт·ч	1,22	2,00	<0,5	-	-	0,75
7	Ресурс до первой переборки	час	15000	4000	-	4000	-	8000
8	Ресурс до капитального ремонта	час	45000	11000	20000	20000	20000	20000
9	Масса	кг	4550	1800	1845	1300	1350	3010
10	Тепловоз	-	ТГМ4, ТГМ4А	ДЛ-2, АЧ2	GSL	-	-	DE1000, ME07

Таблица 2 - Тепловозные дизельные двигатели мощностью 1000 кВт

№ п/п	Параметр	Размерность	Россия		Украина	США		Германия
			ОАО «КЗ»	ОАО «ПДЗ»	ГП завод им. Малышева	Cummins	CAT	MTU
1	Марка дизеля	-	Д49	1ПДГ4Д	Д80	QSK45	3500	396
2	Тип по ГОСТ 10150-88	-	8ЧН26/26	6ЧН31,8/33	12ЧН26/27	12ЧН15,9/15,9	12ЧН17/19	12ЧН16,5/18,5
3	Мощность	кВт	1000	993	993	1007	1000	1000
4	Номинальная частота вращения коленчатого вала	мин <sup>-1</sup>	750	750	750	1800	1800	1800
5	Удельный расход топлива по ГОСТ 22602-91 (UIC623-II)	г/кВт·ч	200	197	205	204	208,2	215
6	Расход масла на угар	г/кВт·ч	1,10	1,09	1,63	-	1,80	1,00
7	Ресурс до первой переборки	час	23500	23500	18800	4000	-	8000
8	Ресурс до капитального ремонта	час	70000	70000	74500	20000	-	20000
9	Масса	кг	16000	17000	17000	5813	6240	3850
10	Тепловоз	-	ТЭМ2 модернизация	ЧМЭ3, ТЭМ18, ТЭМ2	ЧМЭ3	-	-	DE2000

Таблица 3 - Тепловозные дизельные двигатели мощностью 1500 кВт

№ п/п	Параметр	Размерность	Россия			Украина	США			Германия
			ОАО «КЗ»	УДМЗ, завод им. Маминых	РУМО	ГП завод им. Ма- лышева	GE	Cummins	CAT	MAN
1	Марка дизеля	-	Д49	ДМ21	5362	Д80	7FDL	QSK45	3500	RK215
2	Тип по ГОСТ 10150-88	-	12ЧН 26/26	12ЧН 21/21	6ЧН 28/32	10ЧН 26/27	8ЧН 22,9/26,7	12ЧН 15,9/19	12ЧН 17/19	12ЧН 21,5/27
3	Мощность	кВт	1470	1500	1617	1470	1500	1491	1455	1500
4	Номинальная частота вращения коленчатого вала	мин <sup>-1</sup>	750	1600	755	750	1050	1900	1800	1000
5	Удельный расход топлива по ГОСТ 22602-91 (УИС623-II)	г/кВт·ч	198	211	205	197	196	209	192	211,7
6	Расход масла на угар	г/кВт·ч	1,10	1,03	1,00	1,63	0,70	-	1,80	0,58
7	Ресурс до первой переборки	тыс.км(час)	300	(20000)	(12000)	300	-	(4000)	-	(15000)
8	Ресурс до капитального ремонта	тыс.км (час)	1500	(70000)	(70000)	1500	1100	(20000)	(20000)	-
9	Масса	кг	17000	9900	19000	14100	10000	5813	5715	12100
10	Тепловоз	-	М62 модерниза- ция	-	Предло- жение	М62 модерниза- ция	GP18-61, UL17C	-	MP15C	-

Таблица 4 - Тепловозные дизельные двигатели мощностью 2000-2200 кВт

№ п/п	Параметр	Размерность	Россия			Украина		Швеция	Германия	
			ОАО «КЗ»			ГП завод им. Малышева		Hedemora	Henschel	MTU
1	Марка дизеля	-	12Д49М	1А-9ДГ исп.2	1А-9ДГ исп.3	1Д80Б	4Д80А	VS	2423А	956
2	Тип по ГОСТ 10150-88	-	12ЧН26/26	16ЧН26/26	16ЧН26/26	16ЧН26/27	12ЧН26/27	18ЧН21/21	12ЧН24/23	12ЧН23/23
3	Мощность	кВт	2206	2250	2206	2206	2206	2206	2206	2221
4	Номинальная частота вращения коленчатого вала	мин <sup>-1</sup>	1000	1000	850	1000	1000	1200	1500	1500
5	Удельный расход топлива по ГОСТ 22602-91 (УИС623-П)	г/кВт·ч	187	180,2	180,0	193	190	221,6	217,6	217,6
6	Расход масла на угар	г/кВт·ч	1,10	1,00	0,89	1,60	1,60	-	-	2,00
7	Ресурс до первой переборки	тыс.км(час)	(32000)	-	400	-	-	-	-	-
8	Ресурс до капитального ремонта	тыс.км (час)	(60000)	-	1600	-	-	-	-	-
9	Масса	кг	17750	28300	28900	23715	18400	-	-	-
10	Тепловоз	-	232 модерниза- ция	2ТЭ116	ТЭ10 модерниза- ция	2ТЭ116 модерниза- ция	-	-	-	-

Таблица 5 - Тепловозные дизельные двигатели мощностью 2500 кВт

№ п/п	Параметр	Размерность	Россия		США				Германия	
			ОАО «КЗ»		GM	GE	Cummins	CAT	MAN	MTU
1	Марка дизеля	-	21-26ДГ-01	18-9ДГ	710G3	7FDL	QSK78	3608	RK215	4000
2	Тип по ГОСТ 10150-88	-	12ЧН 26/26	16ЧН 26/26	12ДН 23/27,8	16ЧН 22,9/26,7	18ЧН 18/19	8ЧН 28/30	12ЧН 21,5/27	16ЧН 16,5/21
3	Мощность	кВт	2500	2650	2500	2500	2610	2460	2370	2500
4	Номинальная частота вращения коленчатого вала	мин <sup>-1</sup>	1000	1000	900	1050	1900	1000	1000	1800
5	Удельный расход топлива по ГОСТ 22602-91 (UIC623-II)	г/кВт·ч	195	181,4	198	196	201	-	211,7	205
6	Расход масла на угар	г/кВт·ч	0,90	0,81	0,90	0,70	-	0,45-0,55	0,58	1,00
7	Ресурс до первой переборки	тыс.км(час)	400	-	400-600	-	(4000)	(20000)	(15000)	(10000)
8	Ресурс до капитального ремонта	тыс.км (час)	1600	-	-	1100	(20000)	(80000)	-	(30000)
9	Масса	кг	18000	28500	-	19700	-	20400	12100	-
10	Тепловоз	-	2ТЭ25К	2ТЭ116У, 2ТЭ25КМ	АТ42С	С30-7В	-	-	AD33С	Rh2016

Таблица 6 - Тепловозные дизельные двигатели мощностью 3000-3500 кВт

№ п/п	Параметр	Размерность	Россия	Украина	США			Франция	Германия	
			ОАО «КЗ»	ГП завод им. Малышева	GM	GE	CAT	SEMT Pielstick	MAN	MTU
1	Марка дизеля	-	2А-9ДГ-02	Д80	710G	GEVO	3612	РА6В	RK270	4000
2	Тип по ГОСТ 10150-88	-	16ЧН 26/26	16ЧН 26/27	16ДН 23/27,8	12ЧН 25/32	12ЧН 28/30	8ЧН 28/33	12ЧН 27/30,5	20ЧН 16,5/21
3	Мощность	кВт	3000	2940	3063	3440	3000	2800	3000	2700
4	Номинальная частота вращения коленчатого вала	мин <sup>-1</sup>	1000	1000	900	1050	1000	1000	1000	1800
5	Удельный расход топлива по ГОСТ 22602-91 (UIC623-II)	г/кВт·ч	179	204	198	200	-	-	207	198
6	Расход масла на угар	г/кВт·ч	0,73	1,63	0,90	-	0,45-0,55	0,10	-	0,10
7	Ресурс до первой переборки	тыс.км(час)	250	200	400-600	-	-	-	-	(10000)
8	Ресурс до капитального ремонта	тыс.км (час)	1250	1200	1800	-	-	-	-	(30000)
9	Масса	кг	30050	-	17960	19500	25100	18500	22000	9450
10	Тепловоз	-	ТЭП70, ТЭ70	2ТЭ116, ТЭ10	SD70M, SD70MAC, SD9043MAC	Evolution	-	-	-	МаК2000



представляют двигатели ОАО «Коломенский завод» [2], ОАО «Пензадизельмаш» [7], ПАО «Звезда» [4], ОАО «РУМО» [6], ОАО «Волжский дизель им. Маминых» [3], ОАО «УДМЗ» [5].

Компания GM выпускает двигатели серии 710 размерностью 23/27,6, перекрывающие мощности 1340 – 3580 кВт. Двигатель представляет собой двухтактный дизель с прямоточной продувкой. Привод турбокомпрессоров осуществляется от коленчатого вала через зубчатую передачу и обгонную муфту. Двигатель установлен на тепловозах SD90MAC, SD70, SD70MAC [10].

Компания GE серийно выпускает четырёхтактные дизели 7FDL в 8, 12 и 16 цилиндровом исполнении, перекрывающие мощности от 1500 кВт до 3056 кВт. Применена одноступенчатая импульсная система газотурбинного наддува. Разработан дизель 7HDL совместно с Deutz Energy, который установлен на тепловозах AC6000, Evolution [11].

Фирма Cummins выпускает высокооборотные (1500 – 1900 об/мин) четырёхтактные дизели с числом цилиндров от 6 в рядном исполнении до 18 в V-образном исполнении, перекрывающие мощности от 450 до 3500 кВт. Применена импульсная одноступенчатая схема газотурбинного наддува [9].

Фирмы Европейской школы выпускают как среднеоборотные, так и высокооборотные двигатели.

Высокооборотные дизели фирмы MTU перекрывают мощности от 1000 до 2700 кВт, размерностью 16,5/19 и 16,5/21 в 8, 12, 16 цилиндровом исполнении. На некоторых моделях дизелей применена регистровая система наддува для улучшения работы двигателя на частичных режимах. [13].

Фирма MAN выпускает быстроходные четырёхтактные дизели, перекрывающие мощности от 500 до 3000 кВт, размерностью 12,8/14,2, 21,5/27 и 27/30,5 в 12 цилиндровом исполнении [14].

Компания ОАО «Коломенский завод» является основным поставщиком отечественных дизельных двигателей. Мощностной ряд двигателей

размерностью 26/26 в 8, 12, 16 цилиндром исполнении охватывает диапазон мощностей от 588 до 4412 кВт.

Анализ таблиц 1-6 показывает, что как отечественными, так и зарубежными фирмами представлена мощностная линейка тепловозных дизелей от 500 до 3500 кВт, удовлетворяющая современным требованиям к дизелям тепловозов. По показателю удельной топливной экономичности отечественные двигатели не уступают зарубежным.

Получение высоких значений мощности и удельной топливной экономичности достигнуто путем форсирования двигателя по среднему эффективному давлению, что существенно влияет на форму скоростных характеристик. С увеличением степени форсирования скоростные характеристики смещаются в область повышенных частот вращения коленчатого вала, существенно сужается область рабочих режимов двигателя.

На тепловозах с высокофорсированными дизелями со средним эффективным давлением 1,8-2,3 МПа дальнейшее улучшение удельных показателей и расширение области рабочих режимов возможно несколькими основными путями:

- путем увеличения массогабаритных показателей силовой установки;
- путем применения материалов с принципиально новыми конструктивными свойствами в дизелестроении;
- путем создания и совершенствования систем управления частотой вращения, мощностью и системой наддува.

Первые два подхода наиболее характерны при проектировании и создании новых двигателей. На сегодняшний день достигнуты предельные массогабаритные показатели двигателей по условиям расположения на тепловозе. Создание материалов с принципиально новыми механическими свойствами требует дополнительных прикладных исследований и испытаний.

Третий подход применим не только при создании новых, но и при модернизации уже эксплуатирующихся двигателей.

Таким образом, создание и совершенствование систем управления частотой вращения, подачей топлива и наддувом дизельных двигателей является одним из значимых направлений их развития.

## 1.2 Анализ управляемых систем наддува транспортных дизелей

Существующие управляемые системы наддува дизелей можно принципиально разделить на два направления:

- турбокомпрессор, в том числе и пропускная способность его турбины, рассчитываются на частичный режим работы двигателя, а дополнительными мероприятиями обеспечивается устойчивая работа во всем диапазоне рабочих режимов;
- турбокомпрессор рассчитывается на номинальный режим работы двигателя, а система управления корректирует параметры турбокомпрессора на частичных нагрузках.

Первой и одной из самых простых систем управления наддува была система с выпуском части газа, минуя турбину, в атмосферу [71]. Пропускная способность турбины в этом случае рассчитывалась на частичный режим (как правило 0,7 от номинальной мощности), соответствующий наибольшему крутящему моменту. На режимах выше расчетной мощности для предотвращения чрезмерного увеличения частоты вращения ротора турбокомпрессора открывался клапан и давление наддува поддерживалось примерно постоянным. Этот способ первоначально применялся на авиационных поршневых двигателях с целью предотвращения разрушения турбокомпрессора из-за чрезмерного набора оборотов ротора турбокомпрессора на большой высоте [77]. В наземных условиях такая система нашла широкое применение в дизелях,

для которых приоритетным является обеспечение необходимого коэффициента приспособляемости. Преимущества такой системы – улучшение приемистости дизеля и топливной экономичности на долевых режимах. Недостатки такой системы – ухудшение экономичности на номинальном режиме, так как выпуск части газа снижает КПД турбокомпрессора. Заклинивание клапана выпуска может привести к выходу из строя всего турбокомпрессора.

Развитием предыдущей конструкции являются система с последовательно включенной силовой турбиной и регистровая система наддува. Система с последовательно включенной силовой турбиной состоит из свободного турбокомпрессора, силовой турбины, связанной с коленчатым валом гидромуфтой и зубчатым редуктором, заслонки для подачи газов на силовую турбину, систему управления заслонкой и гидромуфтой. Подобные системы впервые были предложены практически одновременно фирмами MAN (Германия) и АВВ (Швейцария). Экспериментальные исследования такой системы для отечественных двигателей проведены ОАО «Коломенский завод» совместно с АО «ВНИИЖТ» [16, 19]. Турбокомпрессор рассчитывался на режим 0,7 от максимальной мощности, до этого режима силовая турбина отключена. При увеличении мощности выше расчетной заслонка открывается и часть газа передается на силовую турбину, которая передает энергию на коленчатый вал. Преимущества такой системы - экономичность повышается не только на частичных режимах, но и на номинальном режиме при сохранении достаточно высокого КПД турбокомпрессора. Недостатки такой системы – высокая сложность и высокая стоимость. В настоящее время спрос на такие системы невелик и работы по их развитию практически остановлены.

Регистровая система наддува состоит из группы турбокомпрессоров (в элементарном случае двух) вместо одного, рассчитанных на пропуск части отработавших газов. По мере увеличения мощности и частоты вращения коленчатого вала турбокомпрессоры включаются в определенной

последовательности с помощью воздушных и газовых заслонок. Заслонки управляются электронной системой управления. В зависимости от степени форсирования двигателя система может быть исполнена в одноступенчатом и двухступенчатом варианте. В последнем случае, как и при обычном двухступенчатом газотурбинном наддуве, применяются дополнительные охладители наддувочного воздуха [20]. Преимущества такой системы – улучшение приемистости двигателя и снижение расхода топлива. Недостатки такой системы – неизбежное снижение давления наддува, а, следовательно, и мощности дизеля при включении второго турбокомпрессора из-за мгновенного увеличения суммарной пропускной способности турбины. В 2011-2015 годах ОАО «Коломенский завод» создан перспективный 12-цилиндровый двигатель Д500 (12ЧН26,5/31) с регистрацией системой наддува.

К системам второго направления можно отнести систему Гипербар, систему с перепуском части воздуха из компрессора к турбине, систему управляемого привода турбокомпрессора от постороннего источника энергии.

Система Гипербар состоит из отдельного контура, включающего в себя отдельную камеру сгорания, отдельный топливный насос, воздушную и газовую заслонки для отбора части воздуха из компрессора для камеры сгорания [22]. Подача топлива в камеру сгорания позволяет увеличивать мощность турбины и, соответственно, давление наддува независимо от режима работы дизеля. Все элементы отдельного контура управляются электронной системой управления. Преимущества такой системы – получение оптимальных параметров рабочего процесса как на установившихся, так и на переходных неустановившихся процессах. Недостатки такой системы – неизбежное увеличение расхода топлива из-за введения в конструкцию дополнительной камеры сгорания. Система Гипербар находит применение в зарубежных танковых дизелях и главных судовых дизелях военно-морского флота, где обеспечение заданных характеристик дизеля (приемистость, протекание характеристики крутящего

момента, удельная мощность) является приоритетной задачей. В силу указанных особенностей в гражданском дизелестроении и в частности на тепловозных двигателях система не применяется.

Система перепуска воздуха от компрессора к турбине предполагает перепуск части воздуха от компрессора минуя дизель к турбине, что позволяет увеличить давление перед турбиной и ее мощность на частичных режимах. Таким образом, на частичных режимах возможно увеличение давления наддува и мощности двигателя [22]. Преимущества такой системы: система перепуска воздуха от компрессора к турбине может выполнять функции противопомпажного клапана.

Системы, обеспечивающие дополнительный подвод энергии от постороннего источника к турбокомпрессору, в настоящее время представлены следующими техническими решениями:

- подача дополнительного количества сжатого воздуха на лопатки компрессора или турбины;
- подвод энергии с помощью обратимого электродвигателя.

Подача дополнительного количества воздуха на лопатки направляющего аппарата компрессора увеличивает расход воздуха и давление наддува [21]. Исследования, проведенные на Государственном предприятии «Завод им. Малышева» для дизелей типа Д100 и Д70 показали значительное сокращение времени набора нагрузки с режима холостого хода до режима номинальной мощности [15]. Недостатки этой системы: необходим дополнительный источник сжатого воздуха, поэтому практического применения на тепловозных двигателях этот способ не нашел.

Система с подводом энергии с помощью обратимого электродвигателя состоит из турбокомпрессора, обратимого электродвигателя и системы управления. Исследование эффективности такой системы проведены ОАО «СКБТ» и ОАО «Пензадизельмаш» для отечественных дизелей типа 1-ПД4 и

Д49. Получено повышение удельной топливной экономичности на частичных нагрузках [17, 18]. Недостатки этой системы: при использовании электродвигателя, встроенного в турбокомпрессор, ограничена длина его активной части габаритными размерами турбокомпрессора. Использование отдельно стоящего электродвигателя не имеет этого недостатка, но существенно усложняет конструкцию системы.

Также известны системы с регулированием пропускной способности соплового аппарата лопаточных машин, которые предполагают использование специфического механизма поворота каждой лопатки или для осуществления другого движения ее элементов с целью изменения эффективного проходного сечения [23, 24]. При этом обеспечивается необходимая приемистость силовой установки. Исследования подобных систем проведены в 60-х годах ОАО «Коломенский завод» совместно с ООО «ЦНИДИ» [25, 26]. Недостатки этой системы: низкий уровень надежности и высокая стоимость изготовления системы.

Наиболее распространенными на железнодорожном транспорте являются системы перепуска рабочего тела. Исследованию влияния перепуска воздуха на статические характеристики комбинированных двигателей тепловозов посвящены труды Деховича Д.А. [26, 30], Шепелева В.А. [22], Перова К.Ю. [31], Становой Ю.Ю. [72] и др. При перепуске части воздуха получено улучшение удельного среднеэксплуатационного расхода топлива составило 0,5-4,0 % во всем диапазоне работы, причем большие значения относятся к режимам менее 50 % от номинальной мощности. При этом увеличение давления наддува на частичных нагрузках составило до 30 %. Наиболее широко перепуск воздуха используется на автотранспортных двигателях.

Регулирование турбокомпрессора путем перепуска части газов характеризуется перепуском части отработавших газов мимо турбины в атмосферу. При этом снижается располагаемая работа газов и соответственно

мощность турбины. Исследования, выполненные в трудах Шепелева В.А. [22], Шорох В.А. [21], Шапошникова В.Г. [32], Гаврилова А.А. [33], Таманджа Ибрагим [34] и др. показали, что перепуск части газов позволяет ограничивать давление наддува и улучшать приемистость двигателя.

Существующие схемы регулирования наддува достаточно разнообразны, но во всех случаях импульсом для включения перепускных устройств служит сигнал изменения нагрузки на дизель [35-40].

### 1.3 Выводы по разделу 1

Опыт эксплуатации тепловозов с устройствами перепуска рабочего тела показал, что такие системы имеют сложную конструкцию и их выход из строя может приводить к выходу из строя дизель-генераторной установки.

Необходимо отметить, что как теоретические, так и экспериментальные исследования систем перепуска рабочего тела проводились для статических режимов и не оценивались с точки зрения эксплуатации.

Каждый способ регулирования решает отдельную задачу и не является универсальным для всех типов транспортных двигателей. Введение дополнительных устройств усложняет конструктивную схему и снижает надежность двигателя в целом. Окончательная оценка эффективности использования систем регулирования наддува представляет собой технико-экономическую задачу с учетом конкретных режимов и условий работы дизель-генераторной установки, для решения которой необходимо иметь возможность оценивать изменение показателей поездной работы при введении в состав тепловоза новых конструктивных элементов и алгоритмов управления.

Для достижения цели в диссертационной работе поставлены следующие основные задачи:



1. Анализ рабочих процессов совместной работы поршневой части дизеля с агрегатами наддува при применении перепуска рабочего тела.
2. Моделирование показателей работы тепловозной дизель-генераторной установки при различных атмосферных условиях.
3. Анализ влияния способов управления системой наддува на показатели работы тепловоза при выполнении поездной операции.
4. Экспериментальная проверка эффективности предлагаемых способов управления силовой установкой тепловоза.

## 2 Моделирование поездной работы тепловоза при различных атмосферных условиях, способах управления силовой установкой

### 2.1 Анализ методов математического моделирования

Традиционный метод создания новых двигателей предполагает проектирование, создание и экспериментальное исследование ряда опытных вариантов. Одним из рациональных способов повышения качества, сокращения капитальных затрат, периодов разработки, доводки и запуска серийных образцов двигателей является внедрение программно-вычислительных комплексов для проектирования узлов и агрегатов двигателей внутреннего сгорания [56, 57, 67]. При этом проверка работоспособности и соответствия необходимым параметрам систем условного двигателя значительно дешевле создания экспериментального двигателя.

Процессы, определяющие работу дизельного двигателя, имеют различную физическую природу и могут быть описаны фундаментальными законами. При этом детализация описания рабочих процессов зависит от постановки задач исследования. Вопросам исследования статических характеристик комбинированных двигателей посвящены многочисленные работы, отличающиеся подходами к описанию рабочих процессов в поршневой части и продувочно-выпускном тракте двигателя. Известны подробные методы расчета статических характеристик комбинированных двигателей, развитые в работах Е.К. Мазинга, Б.С. Стечкина [80], А.С. Орлина [45, 49-50, 59, 73], Глаголева Н.М. [58], Портнова Д.А. [49], Луканина В.Н. [48], Мизернюка Г.Н. [60, 62, 63], Крутова В.И. [55], Володина А.И. [46], Симпсона А.Э. [47], Эпштейна А.С. [54], Рыжова В.А. [107-109], Кулешова А.С. [60, 61], Савастенко А.А. [106] и др.

В работах Коссова Е.Е. [45, 51-53], К.Г. Михаилиди [64], Сухопарова С.И [65], Бабела М. [79] и др. рассматриваются методы расчета взаимодействия поршневой части двигателя и агрегатов наддува на режимах эксплуатации. Получены оценки расхода топлива и изменения характеристик дизеля в переходных процессах, с учетом параметров лопаточных машин и условий эксплуатации.

В основу принятого расчетного метода положена математическая модель, предложенная Коссовым Е.Е. В качестве недостатков выбранной модели может быть отмечена необходимость использования значительного количества экспериментальных характеристик, получаемых путем стендовых, специальных и реостатных испытаний силовых установок тепловозов заводом-изготовителем. Для решения задач исследования, поставленных в Главе 1, потребовалось повысить точность описания процессов газообмена и ввести уточненные модели в виде подпрограмм в общую программу [100, 103, 104].

При создании и доводке математической модели невозможно учитывать влияние всевозможных эксплуатационных факторов, поэтому целесообразно создание более простой модели, достаточно полно описывающей исследуемые процессы при соответствующих допущениях. В разработанной автором модели приняты следующие основные допущения:

1. Под рабочим телом подразумевается идеальный с термодинамической точки зрения газ, состоящий из свежего заряда и продуктов сгорания.
2. Рабочий процесс дизельного двигателя рассмотрен упрощенно, используются интегральные оценки с учетом экспериментальных данных. При этом рабочий процесс в любой момент времени однозначно определяется совокупностью параметров (частотой вращения коленчатого вала, цикловой подачей топлива, температурой теплоносителей на входе и выходе из дизеля и др.).
3. Течение рабочего тела по газовыхлопному тракту принимается одномерным и квазистационарным.

4. Влияние качества обработки и технического состояния трубопроводов и каналов не учитывается.
5. Реальный процесс горения заменен эквивалентным подводом тепловой энергии к рабочему телу.

Ниже рассмотрены основные положения предложенной математической модели [100], использованной для анализа характеристик дизель-генераторной установки.

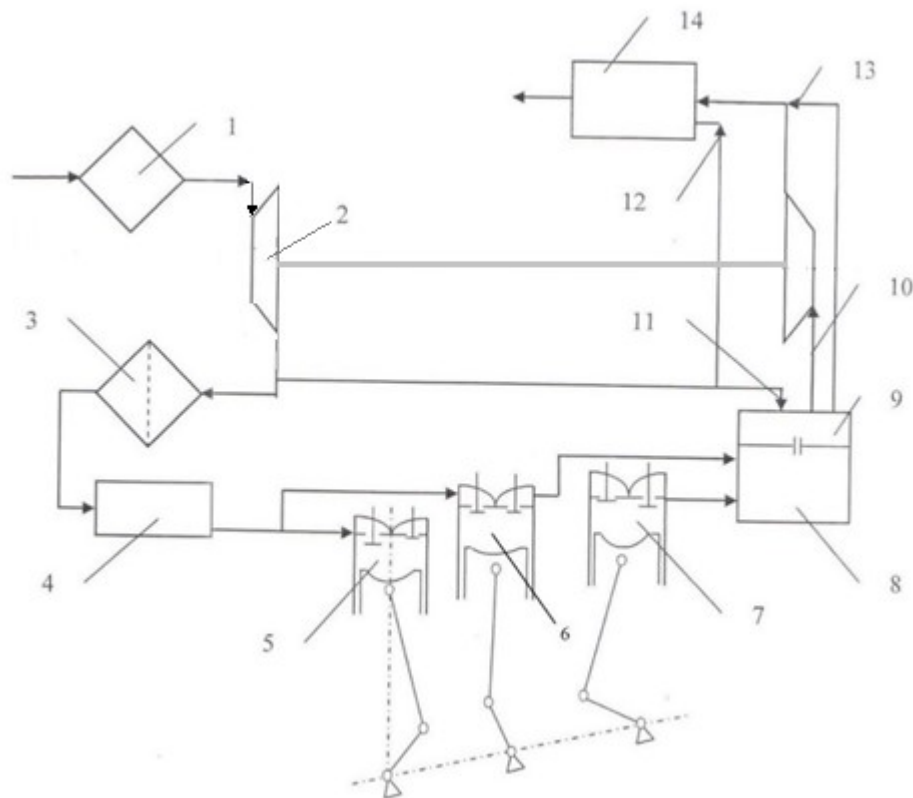
## 2.2 Математическая модель рабочих процессов совместной работы поршневой части дизеля, оборудованного устройствами перепуска рабочего тела, с лопаточными машинами

Наиболее распространенной схемой наддува отечественных магистральных тепловозов является одноступенчатая схема газотурбинного наддува со свободным турбокомпрессором. При построении математической модели была разработана следующая функциональная схема двигателя с одноступенчатым газотурбинным наддувом, приведенная на рисунке 1.

Для описания совместной работы поршневой части дизельного двигателя с агрегатами наддува использованы уравнения, которые принципиально можно разделить на три основные группы:

- уравнения, описывающие квазистационарное одномерное течение рабочего тела по элементам газоздушного тракта при постоянных значениях угловых скоростей коленчатого вала дизеля и турбокомпрессора, температуры и давления наружного воздуха, температуры теплоносителей и др.;
- уравнения, определяющие изменения во времени параметров, определяющих состояние элементов дизеля и агрегатов наддува;
- уравнения, описывающие законы управления подачей топлива, наддувом и нагрузкой дизель-генераторной установки.

Блок-схема алгоритма расчета совместной работы дизеля с лопаточными машинами приведена на рисунке 2.



1. Фильтр. 2. Компрессор турбокомпрессора. 3. Охладитель наддувочного воздуха. 4. Впускной коллектор. 5. Наполнение цилиндров. 6. Продувка цилиндров. 7. Выпуск. 8. Выпускной коллектор. 9. Выпускной коллектор после условной диафрагмы. 10. Параметры газа на входе в турбину. 11. Клапан перепуска воздуха на вход в турбину. 12. Клапан перепуска воздуха за турбину. 13. Клапан перепуска газа за турбину. 14. Глушитель.

Рисунок 1 - Функциональная схема транспортного дизеля



Рисунок 2 - Блок-схема алгоритма расчета рабочих процессов совместной работы дизеля с лопаточными машинами

В блоке 1 начальный режим работы и конструктивные параметры дизель-генераторной установки в виде массивов данных вводятся в расчетный комплекс.

В блоке 2 вычисляется необходимый расход воздуха с учетом работы перепускных устройств при неизменных угловых скоростях вращения коленчатого вала дизеля и турбокомпрессора, температурах теплоносителей и др.

В блоке 3 определяются показатели работы дизеля при текущих значениях частоты вращения коленчатого вала и мощности дизеля.

В блоке 4 происходит интегрирование дифференциальных уравнений при полученном расходе воздуха и заданных законах изменения подачи топлива и нагрузки дизеля.

В блоке 5 проверяются условия окончания переходного процесса с заданной точностью расчета. Если условия не достигнуты, то выводятся промежуточные результаты и расчет продолжается с блока 2. В противном случае выводятся на печать окончательные результаты и расчет заканчивается.

Особенностью разработанной математической модели является то, что двигатель рассматривается как единая система, в которой выделены процессы впуска, продувки и выпуска рабочего тела, а также введены устройства перепуска воздуха к и за турбину, перепуска газа минуя турбину. В математической модели был применен новый подход к определению расхода рабочего тела, проходящего через дизель – заданный и расчетный суммарный массовый расход рабочего тела должны быть одинаковыми [93]. В работах [19, 45, 51, 64, 65, 72, 74] в качестве критерия окончания расчета расхода рабочего тела принималось равенство начального и конечного значения давления рабочего тела атмосферному.

Блок-схема, отражающая основные положения методики расчета рабочего тела приведена на рисунке 3.

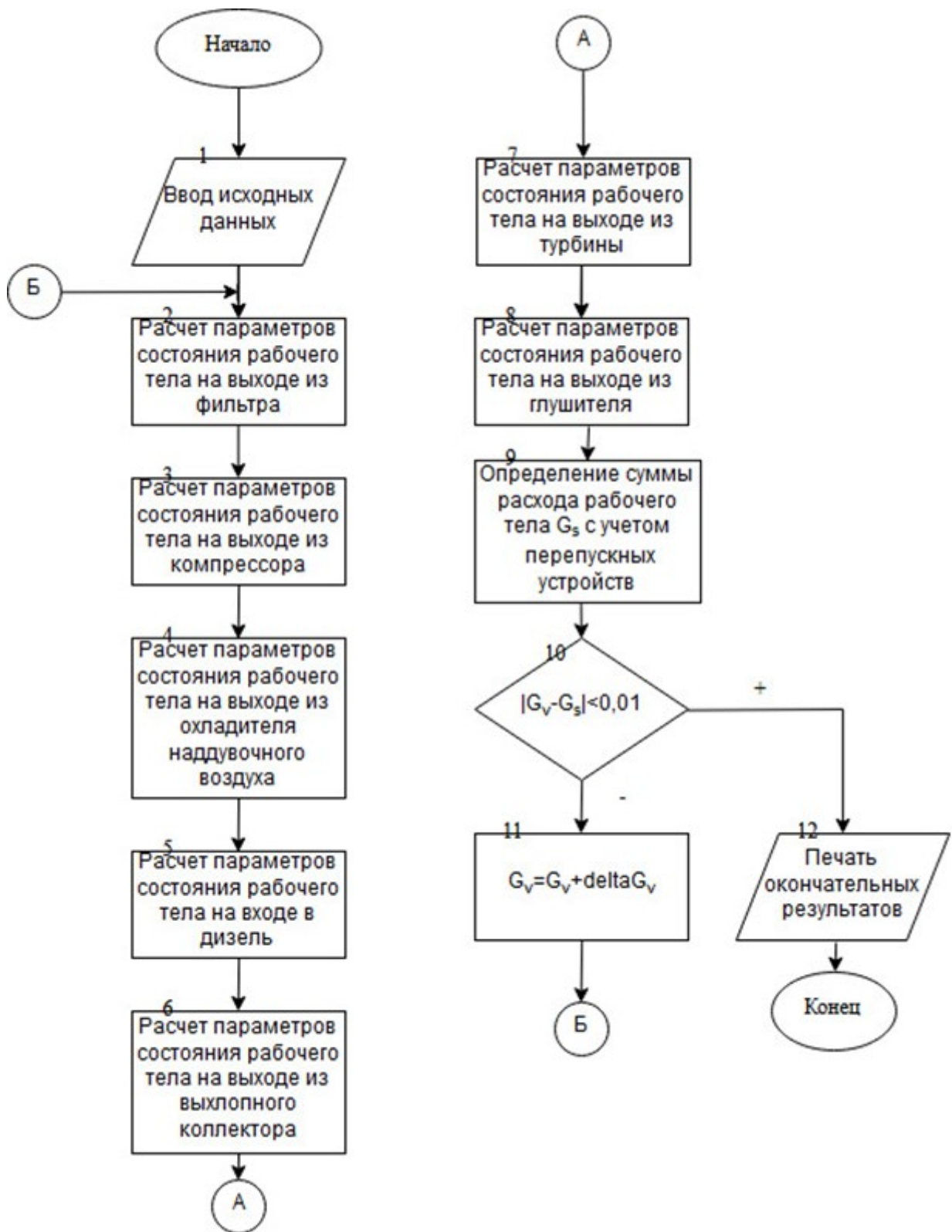


Рисунок 3 - Укрупненная блок-схема расчета расхода рабочего тела



При расчете расхода рабочего тела используется первая группа уравнений, описывающая изменение приращений давлений и температур при истечении рабочего тела по элементам газовой воздушного тракта:

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi_1 = f(G_v, T_0, p_0) \\ p_1 = p_0 \cdot \pi_1 \\ T_1 = f(T_0) \\ \pi_2 = f(G_v, T_0, p_0, \omega_k) \\ p_2 = p_1 \cdot \pi_2 \\ T_2 = f(G_v, T_1, \omega_k, \eta_k) \\ \dots \\ \pi_{11} = f(G_v, T_{10}, p_{10}) \\ p_{11} = p_{10} \cdot \pi_{11} \\ T_{11} = f(T_{10}) \end{array} \right. , \quad (1)$$

где  $\pi_1$  - степень повышения давления в фильтре;  $G_v$  - расход воздуха;  $T_0$  - температура наружного воздуха;  $p_0$  - давление наружного воздуха;  $p_1$  - давление воздуха после фильтра;  $T_1$  - температура воздуха на входе в компрессор;  $\pi_2$  - степень повышения давления в компрессоре;  $\omega_k$  - частота вращения ротора турбокомпрессора;  $p_2$  - давление воздуха за компрессором;  $T_2$  - температура воздуха за компрессором;  $\eta_k$  - КПД компрессора;  $\pi_{11}$  - перепад давлений в глушителе;  $T_{10}$  - температура за турбиной;  $p_{10}$  - давление газов после турбины;  $p_{11}$  - давление газов на выходе из глушителя;  $T_{11}$  - температура газов на выходе из глушителя.

При определении расхода рабочего тела элементы 1, 3, 9 и 14 рассматривались как местные сужения. Для определения расхода воздуха через эквивалентное сечение применялась известная зависимость [68, 69]:

$$G = \mu f \cdot \rho \cdot \sqrt{2 \cdot R \cdot T \cdot \frac{k_r}{k_r - 1}} \cdot \sqrt{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k_r}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k_r + 1}{k_r}}}, \quad (2)$$

где  $G$  - расход рабочего тела;  $\mu f$  - эффективное проходное сечение;  $\rho$  - плотность рабочего тела перед сужением;  $R$  - газовая постоянная;  $T$  - температура рабочего тела перед сужением;  $k_r$  - показатель адиабаты газов;  $p_2$  - давление рабочего тела после сужения;  $p_1$  - давление рабочего тела до сужения.

Из (2) видно, что невозможно однозначно выразить зависимость между расходом рабочего тела и перепадом давлений. В дальнейшем в расчетах были использованы аппроксимации скорости истечения рабочего тела кусочно-показательными функциями [45].

Уравнения, используемые для математического описания изменения параметров рабочего тела в элементах газо-воздушного тракта, не отличались от общепринятых [19, 45, 51, 64, 65, 72, 74].

Характеристики компрессора для использования в расчетах представлялись в форме, предложенной в работе [70]. Принималось, что удельная работа компрессора постоянна при неизменной приведенной частоте вращения ротора турбокомпрессора и соответствует действительной работе на границе помпажа. На других режимах КПД компрессора определялся как частное от деления адиабатической работы на действительную. Принималось, что в любой момент времени выполняется равенство мощностей компрессора и турбины турбокомпрессора. [68. 69].

При расчете поршневой части принималось, что расход рабочего тела многоцилиндрового двигателя определяется суммой расходов при продувке при перекрытии впускных и выпускных клапанов, наполнении цилиндров при перемещении поршней на полный рабочий ход и перепуске части воздуха или газа. Величина индикаторного КПД определялась путем обработки

экспериментальных данных и в расчетах задавалась кусочно-показательными функциями в виде:

$$\eta_i = \begin{cases} c_1, & \alpha \leq 1,0 \\ c_2 - c_3 \cdot (c_4 - \omega_d)^2 - c_5 \cdot (c_6 - \alpha)^2, & 1,0 < \alpha \leq 2,5, \\ c_7 - c_8 \cdot (c_9 - \omega_d)^2 - c_{10} \cdot (c_{11} - \alpha)^2, & \alpha > 2,5 \end{cases} \quad (3)$$

где  $c_1 - c_{11}$  - постоянные коэффициенты;  $\eta_i$  - индикаторный КПД дизеля;  $\alpha$  - суммарный коэффициент избытка воздуха;  $\omega_d$  - частота вращения коленчатого вала дизеля.

При анализе процессов в выпускном коллекторе принималось, что процесс истечения состоит из нескольких последовательных процессов:

- изоэнтальпийное истечение газов и продувочного воздуха;
- полное перемешивание продувочного воздуха с выпускными газами;
- истечение через условное сопротивление между сечениями 8 и 9.

Температура отработавших газов на выходе из выпускного коллектора определялась при условии полного перемешивания продувочного воздуха с выпускными газами и с учетом потерь тепла от неполноты сгорания топлива.

Система уравнений, определяющих изменения во времени параметров, определяющих состояние элементов дизеля и агрегатов наддува, описана следующими зависимостями:

$$\begin{cases} \frac{d\omega_d}{dt} = \frac{1}{J_d \cdot \omega_d} \cdot (P_i - P_e - P_{MEK}) \\ \frac{d\omega_{TK}}{dt} = \frac{1}{J_{TK} \cdot \omega_K} \cdot (P_T - P_K) \\ \frac{dT_w}{dt} = f(m_w, T_8, f_a, f_{a'}, \alpha \dots) \end{cases} \quad (4)$$

где  $\frac{d\omega_d}{dt}$  - приращение частоты вращения коленчатого вала на шаге расчета;  $J_d$  - суммарный момент инерции коленчатого вала и присоединенных агрегатов;  $P_i$  - индикаторная мощность дизеля;  $P_e$  - эффективная мощность дизеля;  $P_{мех}$  - мощность механических потерь в дизеле;  $\frac{d\omega_{TK}}{dt}$  - приращение частоты вращения вала турбокомпрессора на шаге расчета;  $J_{TK}$  - суммарный момент инерции вала турбокомпрессора и присоединенных агрегатов;  $P_T$  - мощность турбины;  $P_K$  - мощность компрессора;  $T_w$  - температура воды, омывающей коллектор;  $m_w$  - масса прогреваемой части коллектора;  $T_8$  - температура на входе в выпускной коллектор;  $f_a, f_{a'}$  - площадь поверхностей  $a$  и  $a'$  соответственно;  $\alpha$  - коэффициент теплопередачи.

Для исключения влияния качества изготовления эксплуатируемых систем управления подачей топлива, наддувом и нагрузкой дизель-генераторной установки логические связи представлены идеализированными исполнительными устройствами, в которых скорость изменения управляемой величины прямо пропорциональна величине рассогласования и обратно пропорциональна постоянной времени:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{A^* - A}{T_A}, \quad (5)$$

где  $\frac{dA}{dt}$  - приращение управляемой величины на шаге расчета;  $A^*$  - заданное значение управляемой величины;  $A$  - текущее значение управляемой величины;  $T_A$  - постоянная времени управляемой величины.

При расчетах задавался приоритет на выполнение заданных расчетом углового ускорения коленчатого вала дизеля и скорости изменения мощности тягового генератора на клеммах выпрямительной установки.

### 2.3 Оценка адекватности моделирования совместной работы поршневой части дизеля, оборудованного устройствами перепуска рабочего тела, с лопаточными машинами

Приемлемость допущений, принятых при разработке математической модели дизеля, оборудованного устройствами перепуска воздуха и газов, определялась сравнением основных характеристик дизеля. Методически параметры установившихся режимов получались как конечный результат переходного процесса с холостого хода на заданную позицию контроллера машиниста. Численные значения, полученные в результате математического моделирования, сравнивались с данными, полученными автором при проведении реостатных испытаний тепловозов, оборудованных электронными системами управления подачей топлива, наддувом и нагрузкой в 2016 г. в Сервисном локомотивном депо Саратов – филиале ООО «ТМХ-Сервис».

В таблице 7 представлено сравнение экспериментальных данных, полученных при реостатных испытаниях секции А тепловоза 2ТЭ116 № 1737 и расчетных данных при работе по тепловозной характеристике с номинальной частотой вращения коленчатого вала дизеля  $1000 \text{ мин}^{-1}$ .

В таблице 8 представлено сравнение экспериментальных данных, полученных при реостатных испытаниях секции Б тепловоза 2ТЭ116 № 1733 и расчетных данных при работе по тепловозной характеристике с номинальной частотой вращения коленчатого вала дизеля  $850 \text{ мин}^{-1}$ .

Анализ таблиц 7 и 8 показывает удовлетворительную сходимость экспериментальных и расчетных данных. При работе по тепловозной

Таблица 7 - Сравнение основных параметров ДГУ секции А тепловоза 2ТЭ116 № 1737 и результатов расчета при работе по тепловозной характеристике с номинальной частотой вращения коленчатого вала дизеля 1000 об/мин

№ п/п	Параметр	Единица измерения	Значение параметра					
			1737	расчет	1737	расчет	1737	расчет
1	Частота вращения коленчатого вала дизеля	об/мин	1000	999,97	902	904,97	805	805,55
2	Мощность тягового генератора на клеммах ВУ	кВт	2130,00	2117,18	1680,00	1684,33	1170,00	1168,65
3	Частота вращения ротора турбокомпрессора, натуральная	об/мин	20665	20601	17348	16693	13041	13808
4	Часовой расход топлива	кг/ч	534	530	-	394,5	-	288
5	Удельный электрический расход топлива	кг/кВт ч	0,250	0,250	-	0,234	-	0,246
6	Давление воздуха в ресивере	кПа	280,00	288,71	218,00	219,15	169,00	176,24
7	Температура газов на выходе из цилиндров	°С	426	433,74	418	427,57	422	409,85
8	Максимальное давление сгорания	МПа	13,00	13,28	-	10,12	-	8,18

Таблица 8 - Сравнение основных параметров ДГУ секции Б тепловоза 2ТЭ116 № 1733 и результатов расчета при работе по тепловозной характеристике с номинальной частотой вращения коленчатого вала дизеля 850 об/мин

№ п/п	Параметр	Единица измерения	Значение параметра					
			1733	расчет	1733	расчет	1733	расчет
1	Частота вращения коленчатого вала дизеля	об/мин	849	849,98	789	789,16	720	720,79
2	Мощность тягового генератора на клеммах ВУ	кВт	2262	2262,98	1771	1737,75	1220	1179,9
3	Частота вращения ротора турбокомпрессора, натуральная	об/мин	20059	19921	17011	16901	12834	13115
4	Часовой расход топлива	кг/ч	500,8	501,8	398	400	289,5	289,0
5	Удельный электрический расход топлива	кг/кВт ч	0,221	0,221	0,224	0,230	0,237	0,244
6	Давление воздуха в ресивере	кПа	277	290,68	225	229,42	166	168,8
7	Температура газов на выходе из цилиндров	°С	449	433,25	450	448,35	457,5	460,84
8	Максимальное давление сгорания	МПа	13,80	13,47	11,50	10,65	-	7,86

характеристике с номинальной частотой вращения коленчатого вала дизеля 1000 мин<sup>-1</sup> получена максимальная погрешность 4,2 %, при работе по тепловозной характеристике с номинальной частотой вращения коленчатого вала дизеля 850 мин<sup>-1</sup> получена максимальная погрешность 5,0 %.

Изменение расчетных значений, полученное при моделировании процессов перепуска воздуха и отработавших газов, имеет удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными, полученными В.А. Шепелевым для дизелей типа 12ЧН26/26 мощностью 2650 кВт [22]. Максимальное отклонение расчетных данных от экспериментальных составило не более 2 %.

Таким образом, разработанная математическая модель рабочих процессов совместной работы поршневой части дизеля с лопаточными машинами может быть использована для анализа влияния изменения количества перепускаемого рабочего тела и атмосферных условий на показатели работы дизеля.

## 2.4 Имитационная модель поездной работы магистрального тепловоза

В работе [89] предложено заменить поездную работу маневрового локомотива некоторым набором элементарных поездных операций. Такой способ представления поездной работы позволил учесть процессы трогания, переходные процессы в силовой установке локомотива и влияние затрат мощности на привод вспомогательного оборудования [90] на общие показатели поездной работы. В диссертационном исследовании основные выводы работы [89] использованы не для маневрового, а для магистрального грузового тепловоза.

Примененный в работе [89] подход имеет локальные недостатки:

1. Представление элементарных режимов работы маневрового локомотива в виде матрицы для каждого средневзвешенного параметра (например, веса состава) нецелесообразно, так как подобных параметров, заданных случайными



величинами может быть несколько. Формирование обобщённой матрицы будет сложной и требующей дополнительного обоснования задачей.

2. Поездная операция маневрового тепловоза представлена суммой элементарных поездных операций, но это не совсем так. Поездная операция тепловоза представляет собой множество обобщенных режимов, зависящих в свою очередь, от ограниченного множества случайных величин уклона пути, скорости, веса состава и т.п. При этом количественные показатели поездной работы (расход топлива, пробег локомотива, время выполнения поездной работы и т.п.) определяются суммой соответствующих значений за период выполнения поездной операции.

Для магистрального грузового тепловоза выделены по аналогии с [89] следующие типы обобщенных режимов ведения [99]: «Разгон (Р)», «Движение с постоянной скоростью (П)», «Движение в режиме выбега (В)», «Стоянка (С)», «Торможение (Т)» и «Маневровая операция одиночным локомотивом (М)». Количество этих режимов задается случайной величиной  $k$ . Тогда множество обобщенных режимов ведения  $A$  может быть описано числовой последовательностью:

$$A = \{ a_k \}, \quad (6)$$

где  $a_k$  -  $k$ -тый член множества  $A$ ;  $k = 1, 2, \dots, n$  - дискретная случайная величина.

Каждый обобщенный режим ведения характеризуется некоторыми начальными условиями (координата местоположения, скорость, масса состава и т.п.). Множество начальных условий задается случайными величинами, а также может быть задано достаточно большим ограниченным набором числовых последовательностей, члены которых могут быть определены, например, с помощью порождающей процедуры [91]. В качестве примера рассмотрим множество значений начальной скорости тепловоза  $V_1$ :

$$B_1 = \{ b_{1j} \mid b_{11} = 0, b_{12} = 10, b_{1j} = b_{1j-1} + 10 \}, \quad (7)$$

где  $b_{1j}$  -  $j$ -тый член множества  $B_1$ .

У множеств значений начальных условий  $B_1, B_2, \dots, B_m$  нет общих элементов, то есть они являются дизъюнктными. Множества начальных элементов можно представить в виде семейства множеств, перечисленных индексами из  $I$ :

$$\{ B_i \mid i \in I \}, \quad (8)$$

Тогда для получения набора начальных условий выполняется дизъюнктное объединение [92]:

$$\bigcup_{i \in I} \{ (x, i) \mid x \in B_i \}. \quad (9)$$

Порядок чередования режимов в этом случае не имеет определяющего значения, для каждого обобщённого режима ведения используется весь набор начальных условий. В (12) приведен набор начальных условий для одного обобщённого режима «Разгон»:

$$B = \left\{ \begin{array}{l} b_{1j} \mid b_{1j} \in Z, 0 \leq b_{1j} \leq 40 \\ b_{2j} \mid b_{2j} \in Z, 20 \leq b_{2j} \leq 80 \\ b_{3j} \mid b_{3j} \in Z, 100 \leq b_{3j} \leq 1000 \\ b_{4j} \mid b_{4j} \in Z, 0 \leq b_{4j} \leq 9 \end{array} \right\}, \quad (10)$$

где  $j = 1, 2, \dots, J$  - количество элементов в множестве начальных условий.

В первой строке множества (10) начальных условий приведены значения начальной скорости движения поезда, во второй строке приведены значения конечной скорости движения поезда, в третьей строке приведены значения координаты начального местоположения головы поезда, в четвертой строке приведены значения профиля участка пути. Структура построения множества начальных условий для других обобщенных режимов аналогична структуре множества (10).

Таким образом, тяговый режим может быть представлен некоторым множеством  $C$ , полученного путем прямого (или так называемого декартового) произведения множеств (6) и (9):

$$C = \{a_k\} \times \bigcup_{i \in I} \{(x, i) | x \in B_i\}. \quad (11)$$

Для расчета характеристик дизель-генераторной установки тепловоза использовалась математическая модель, основные положения которой приведены в п. 2.2.

При моделировании движения поезда для определения приращений и текущих значений скорости и пути за шаг интегрирования применен метод Эйлера. В качестве независимой переменной принимается время [83]. Текущее значение времени определяется по следующей зависимости:

$$t_j = t_{j-1} + \Delta t, \quad (12)$$

где  $t_j$  - значение времени за шаг интегрирования;  $t_{j-1}$  - текущее значение времени;  $\Delta t$  - шаг интегрирования.

Текущее значение скорости движения тепловоза определялось по следующей зависимости:

$$V_j = V_{j-1} + k \cdot (f - \omega - b) \cdot \Delta t, \quad (13)$$

где  $V_j$  - значение скорости движения тепловоза за шаг интегрирования;  $V_{j-1}$  - текущее значение скорости движения тепловоза;  $k$  - коэффициент, учитывающий размерность переменных, заданных в единицах, не соответствующих системе СИ;  $f$  - удельная сила тяги;  $\omega$  - общее удельное сопротивление движению поезда;  $b$  - удельная замедляющая сила.

Удельная сила тяги определялась по следующей зависимости:

$$f = \frac{F_{\kappa}}{m_{\text{л}} + m_{\text{с}}} . \quad (14)$$

Общее удельное сопротивление движению поезда определялось суммой основного удельного сопротивления движению локомотива и основного удельного сопротивления движения состава.

Основное удельное сопротивление движению состава определялось следующей зависимостью [81]:

$$\omega_0'' = c_1 + \frac{c_2 + c_3 \cdot V + c_4 \cdot V^2}{q_0} , \quad (15)$$

где  $c_1 - c_4$  - постоянные коэффициенты;  $q_0$  - масса, приходящаяся на ось колесной пары груженого вагона.

Основное удельное сопротивление движению тепловоза определялось следующей зависимостью [81]:

$$\omega_0' = c_1 + c_2 \cdot V + c_3 \cdot V^2 , \quad (16)$$

где  $c_1 - c_3$  - постоянные коэффициенты.

Удельная замедляющая сила определялась по следующей зависимости:

$$b = \frac{B}{m_{\text{л}} + m_{\text{с}}} , \quad (17)$$

где  $B$  - сила торможения.

Текущее значение пройденного пути определялось по следующей зависимости:

$$S_j = S_{j-1} + \frac{(V_j + V_{j-1}) \cdot \Delta t}{2} , \quad (18)$$

где  $S_j$  - значение пройденного пути за шаг интегрирования;  $S_{j-1}$  - текущее значение пройденного пути.

Множество обобщенных режимов движения поезда и множество начальных условий выбирались таким образом, чтобы отклонение относительного времени работы силовой установки тепловоза по позициям контроллера управления не превышало 5 % от общего времени работы. Время работы по позициям контроллера машиниста для обоих случаев приведены на рисунке 4. Количественная оценка соответствия дана путем определения расстояния Бхаттчарья [97], которое показало удовлетворительное совпадение полученных данных.

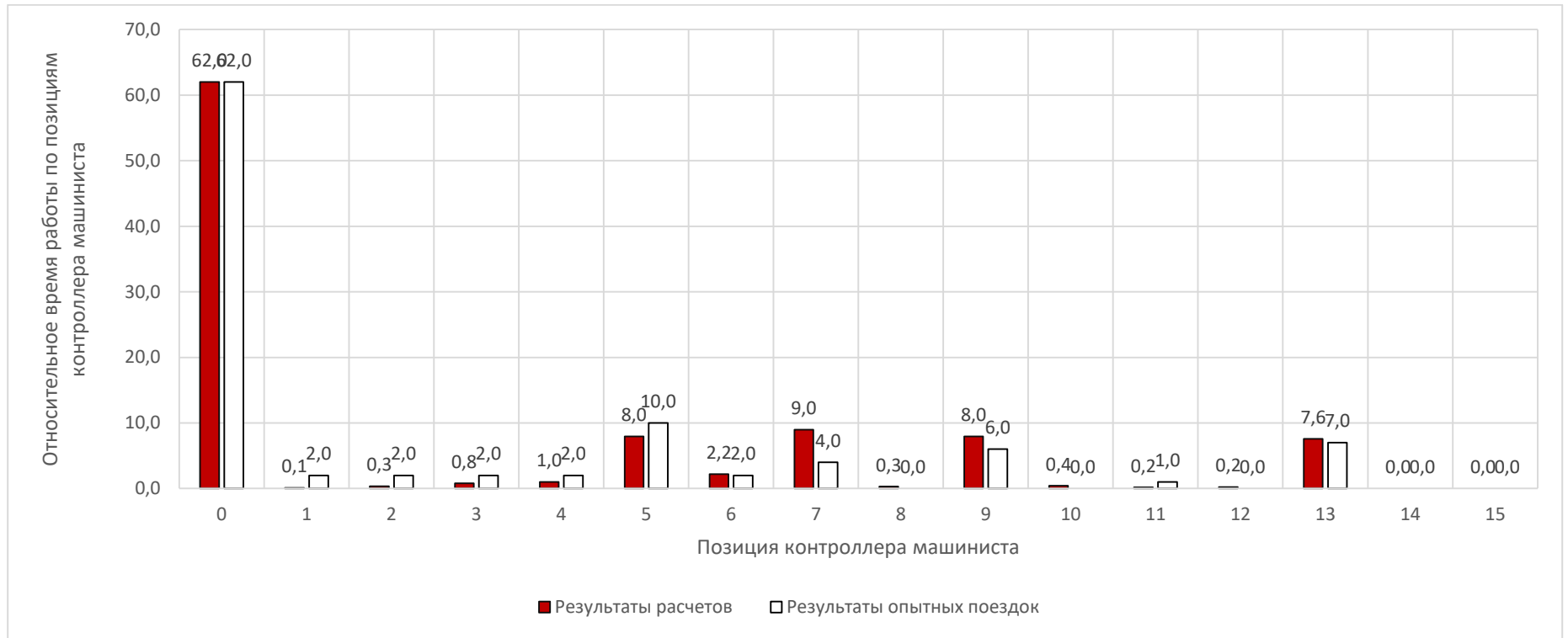


Рисунок 4 - Относительное время работы по позициям контроллера машиниста, полученное в результате проведения опытных поездок и расчетными методами

## 2.5 Выводы по разделу 2

1. Разработана математическая модель рабочих процессов совместной работы дизеля с лопаточными машинами, которая позволяет оценивать влияние изменения количества перепускаемого рабочего тела и внешних атмосферных условий на показатели работы дизеля. При моделировании максимальное отклонение расчетных данных от экспериментальных не превысило 5 %.
3. Предложенные алгоритмы расчета поездной работы позволяют давать количественную оценку влияния алгоритмов управления на показатели поездной работы при изменении атмосферных условий.

### 3 Оценка эффективности электронной системы управления

#### 3.1 Численное исследование работы дизелей типа 16ЧН26/26 с различными способами управления силовой установкой на эксплуатационных режимах

Предпосылками для создания электронных систем управления подачей топлива, наддувом и нагрузкой дизель-генератора тепловоза 2ТЭ116 с целью повышения его топливной экономичности явилась установленная возможность снижения удельного эксплуатационного расхода топлива дизель-генераторной установкой 1А-9ДГ исп. 2 тепловоза серии 2ТЭ116 на 8-9 % путем изменения его генераторной характеристики с реализацией полной мощности при частоте вращения коленчатого вала в диапазоне от  $850 \text{ мин}^{-1}$  до  $1000 \text{ мин}^{-1}$  и применения усовершенствованных узлов: электронной системы регулирования частоты вращения и мощности ЭРЧМ30Т, топливных кулаков измененной конструкции для увеличения объемной скорости плунжера, поршней с повышенной степенью сжатия и модифицированных турбокомпрессоров, настроенных на повышенное давление наддува [82]. Настоящее исследование является развитием полученных результатов для дизеля размерности 16ЧН26/26 с более высокой степенью форсирования по давлению наддува [101, 105].

Целью численного исследования является выбор оптимальной с точки зрения топливной экономичности варианта системы управления частотой вращения коленчатого вала, подачей топлива и системой наддува транспортного двигателя размерностью 16ЧН26/26.

Численное исследование проведено в широком диапазоне изменения температур окружающего воздуха с использованием математических моделей, основные положения которых рассмотрены в Главе 2.



Для выполнения постановленной цели численного исследования выбраны следующие комбинации вариантов системы управления частотой вращения коленчатого вала, мощностью и системой наддува:

1. Штатная система управления дизелем и регулированием наддува путем перепуска воздуха от компрессора за турбину (вариант №1).
2. Опытная система управления частотой вращения коленчатого вала, мощностью и системой наддува, реализующая алгоритмические защиты дизеля снижением мощности (вариант №2).
3. Опытная система управления частотой вращения коленчатого вала, мощностью и регулированием наддува путем перепуска воздуха от компрессора к турбине (вариант №3).
4. Опытная система управления частотой вращения коленчатого вала, мощностью и регулированием наддува путем перепуска воздуха от компрессора за турбину (вариант №4).
5. Опытная система управления частотой вращения коленчатого вала, мощностью и регулированием наддува путем перепуска отработавших газов за турбину (вариант №5).

В качестве базового варианта принимается вариант №1. Для выбора оптимальной с точки зрения топливной экономичности варианта системы управления нагрузкой и наддувом двигателя необходимо выполнить:

1. Расчет и анализ характеристик дизельного двигателя размерности 16ЧН26/26 с различными вариантами регулирования наддува в широком диапазоне изменения температур окружающего воздуха;
2. Имитационное моделирование поездной работы тепловоза, оборудованного различными вариантами систем управления частотой вращения коленчатого вала, мощностью тяговой передачи и системой наддува;

3. Анализ топливной экономичности двигателя тепловоза, оборудованного различными вариантами систем регулирования наддува;
4. Выбор системы управления частотой вращения коленчатого вала, мощностью и системой наддува дизеля, обеспечивающую наибольшую топливную экономичность и устойчивую работу дизель-генераторной установки в эксплуатации.

### 3.1.1 Анализ показателей работы дизеля при работе по опытным характеристикам без перепуска рабочего тела

Устойчивая работа дизель-генераторной установки возможна при ее характеристиках, не выходящих за ограничительные, которые регламентируются Техническими условиями на поставку и приведены в таблице 9 [44, 66]. Максимальное давление сгорания, температура газов перед турбиной и частота вращения ротора турбокомпрессора могут быть определены прямым измерением.

Таблица 9 - Ограничительные параметры

№ п/п	Параметр	Размерность	Значение [44, 66]
1	Длительная частота вращения ротора ТК $n_t$	мин <sup>-1</sup>	23000
2	Температура газов перед турбиной при длительной работе $T_{g1}$	°С	600
3	Максимальное давление сгорания при нормальных условиях $p_{max}$	МПа	14

Дополнительным параметром, определяющим устойчивую работу дизель-генераторной установки, является коэффициент запаса устойчивой работы [26]:

$$k_y = \left[ \frac{G_{кр} \cdot \pi_{кр}}{G_{кр} \cdot \pi_{кр}} \right] \cdot 100\%, \quad (19)$$

где  $k_y$  - коэффициент запаса устойчивой работы;  $G_{кр}$  - расход воздуха на линии рабочих режимов;  $G_{кр}$  - расход воздуха на границе устойчивой работы;  $\pi_{кр}$  - степень повышения давления на линии рабочих режимов при расходе воздуха  $G_{кр}$ ;  $\pi_{кр}$  - степень повышения давления на границе устойчивой работы.

На рисунке 5 приведены результаты моделирования характеристик дизеля на режиме номинальной мощности при изменении температуры окружающего воздуха от минус 40°C до плюс 40°C.

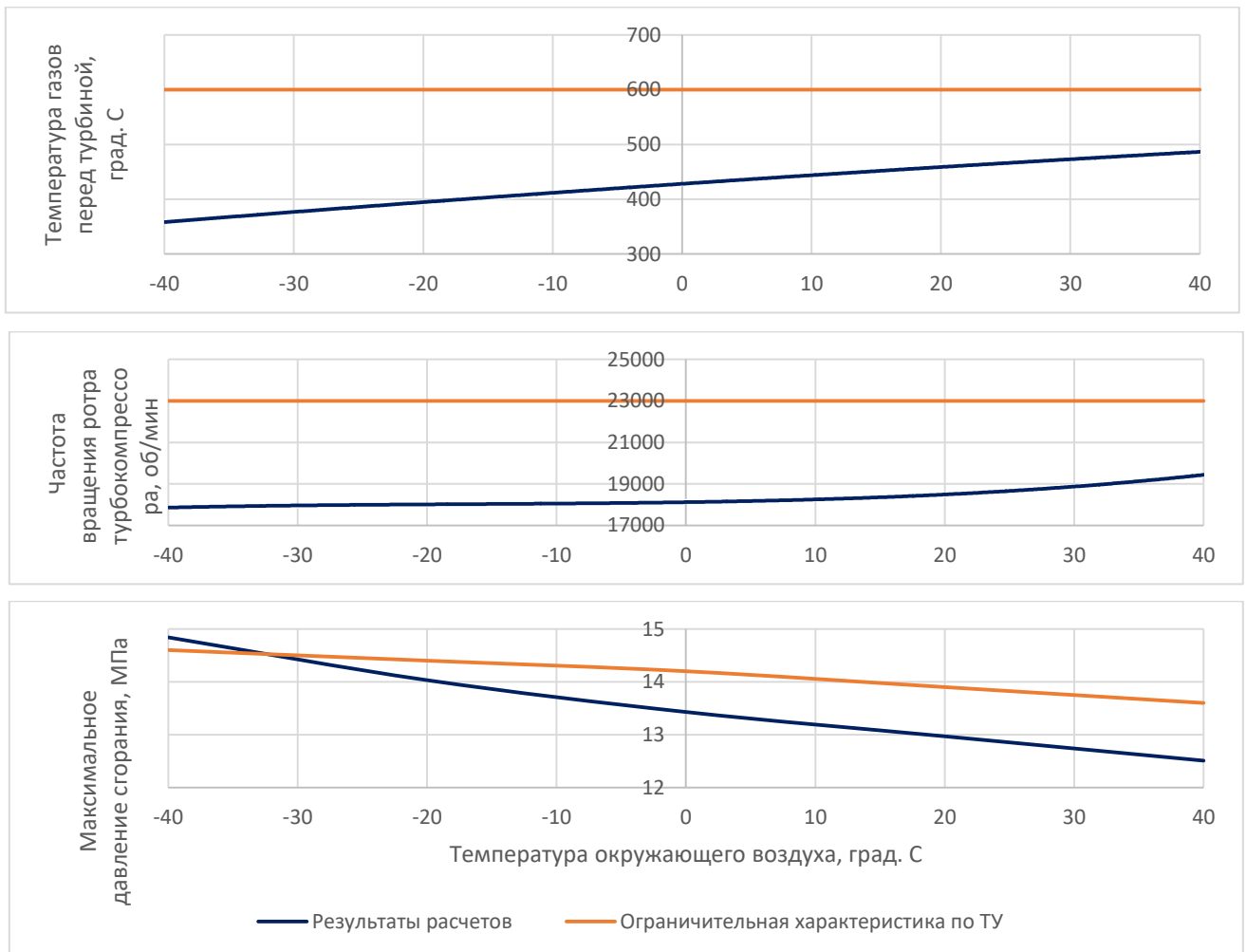


Рисунок 5 - Результаты моделирования характеристик дизеля при работе по опытным тепловозным характеристикам

При работе по опытной тепловозной характеристике во всем диапазоне температур показатели работы двигателя удовлетворяют ограничениям, приведенным в таблице 5, кроме величины максимального давления сгорания. Из рисунка 5 видно, что при температуре наружного воздуха ниже минус 30 °С необходимо внедрение мероприятий, обеспечивающих удаление линии рабочих режимов от ограничительной линии устойчивой работы. При этом снижается коэффициент запаса устойчивой работы турбокомпрессора на 7-9 % по сравнению с штатной тепловозной характеристикой [98].

### 3.1.2 Анализ показателей работы дизеля при работе по опытным характеристикам с перепуском воздуха на вход в турбину

Результаты моделирования показателей работы дизельного двигателя с перепуском воздуха от компрессора на вход в турбину на режиме номинальной мощности в диапазоне изменения температуры окружающего воздуха от минус 40°С до плюс 40°С приведены на рисунках 6-7.

Из рисунков 6 и 7 видно, что при перепуске воздуха на вход в турбину по сравнению с вариантом № 1:

1. снижается давление наддува на 4,2-5,1 %;
2. повышается давление газов на 1,9-4,8 %;
3. снижается максимальное давление сгорания цикла на 1,7-3,0 %;
4. снижается температура отработавших газов перед турбиной на 2,9-9,7 %;
5. повышается суммарный коэффициент избытка воздуха на 9,8-12,1 %;
6. снижается удельный эффективный расход топлива на 0,3-0,7 %.

Увеличение коэффициента запаса устойчивой работы составило 8,8-10,1 %.

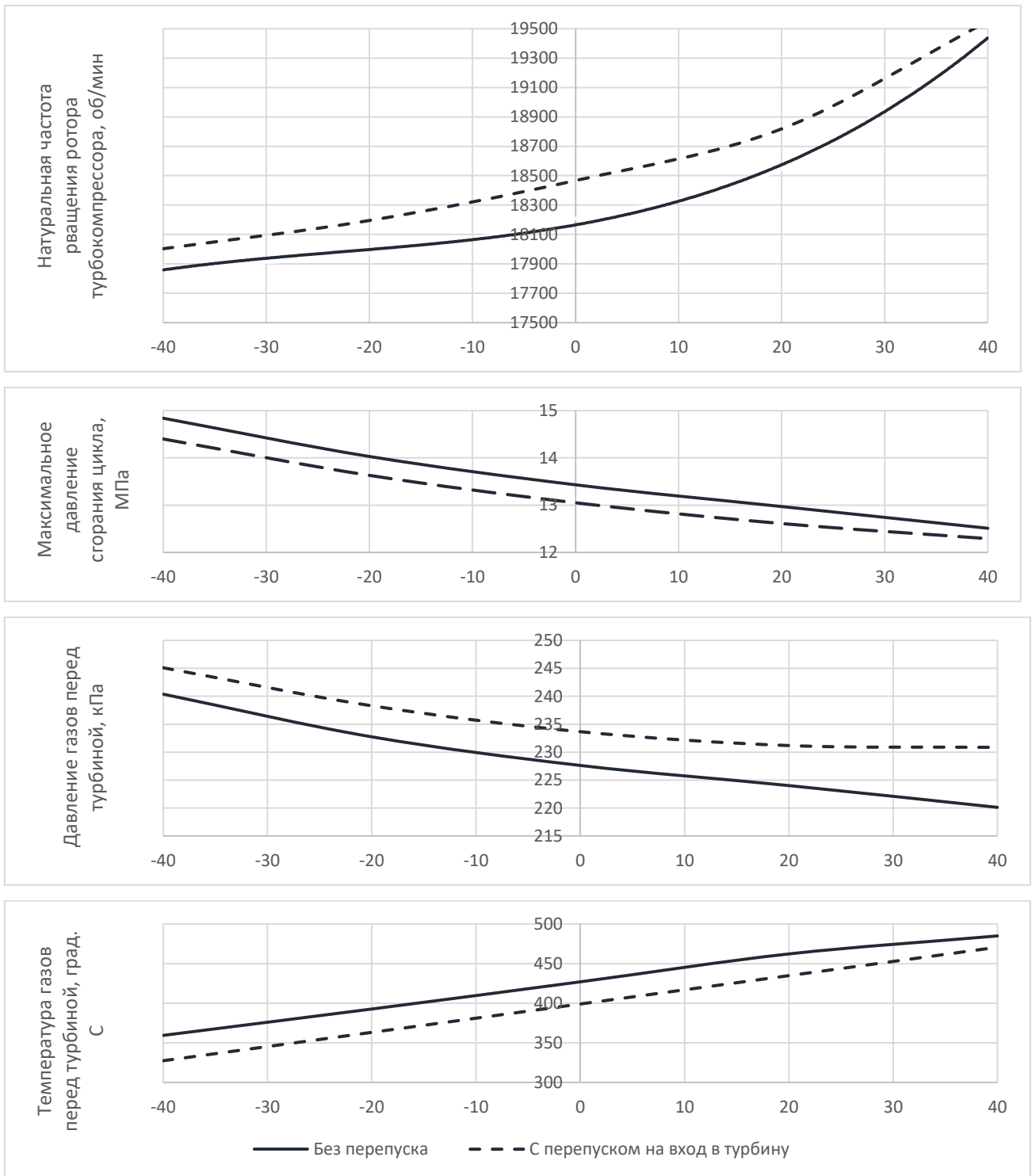


Рисунок 6 - Результаты моделирования

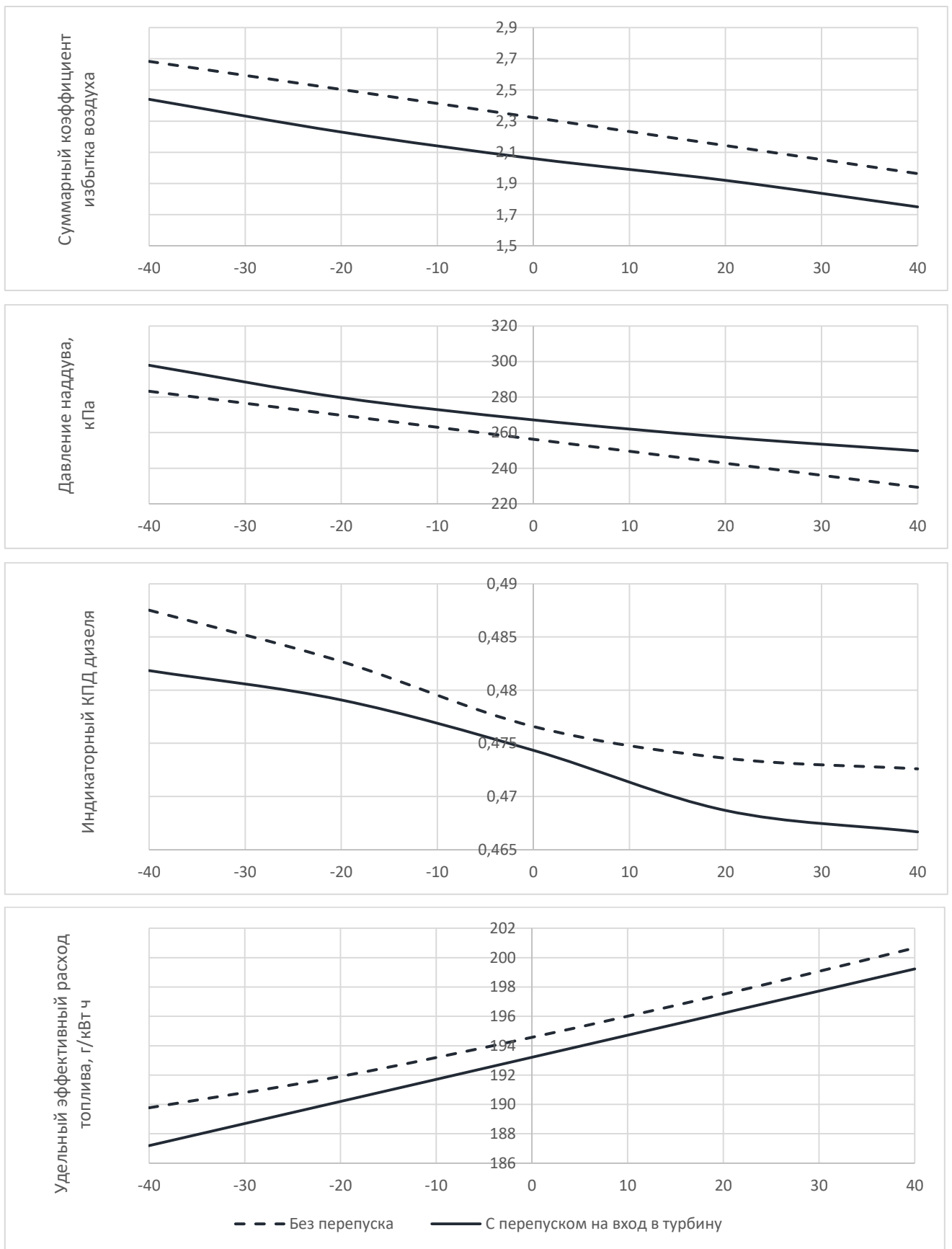


Рисунок 7 - Результаты моделирования

### 3.1.3 Анализ показателей работы дизеля при работе по опытным характеристикам с перепуском воздуха за турбину

Результаты моделирования показателей работы дизельного двигателя с перепуском воздуха от компрессора за турбину на режиме номинальной мощности в диапазоне изменения температуры окружающего воздуха от минус 40°С до плюс 40°С приведены на рисунках 8-9.

Из рисунков 8 и 9 видно, что при перепуске воздуха на вход в турбину по сравнению с вариантом № 1:

1. снижается давление наддува на 10,0-29,7 %;
2. снижается давление газов на 12,2-22,0 %;
3. снижается максимальное давление сгорания цикла на 24,8-31,1 %;
4. повышается температура отработавших газов перед турбиной на 4,8-22,5%;
5. снижается суммарный коэффициент избытка воздуха на 8,0-35,4 %;
6. повышается удельный эффективный расход топлива на 2,2-5,1 %.

Увеличение коэффициента запаса устойчивой работы составило 15,5-19,3 %.

### 3.1.4 Анализ показателей работы дизеля при работе по опытным характеристикам с перепуском газа за турбину

Результаты моделирования показателей работы дизельного двигателя с перепуском газа за турбину на режиме номинальной мощности в диапазоне изменения температуры окружающего воздуха от минус 40°С до плюс 40°С приведены на рисунках 10-11.

Из рисунков 10 и 11 видно, что при перепуске воздуха на вход в турбину по сравнению с вариантом № 2:

1. снижается давление наддува на 8,9-16,7 %;
2. снижается давление газов на 9,4-16,5 %;

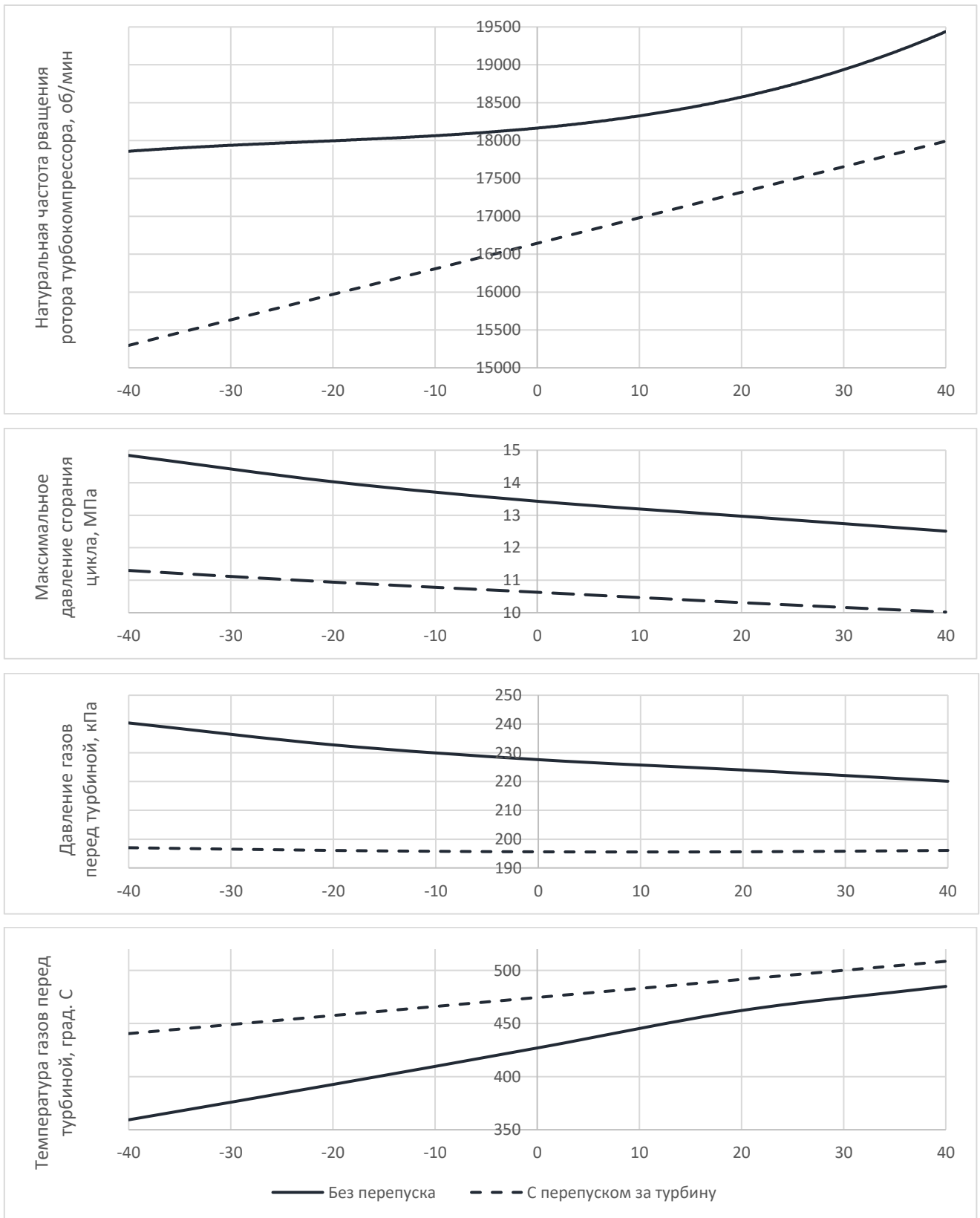


Рисунок 8 - Результаты моделирования



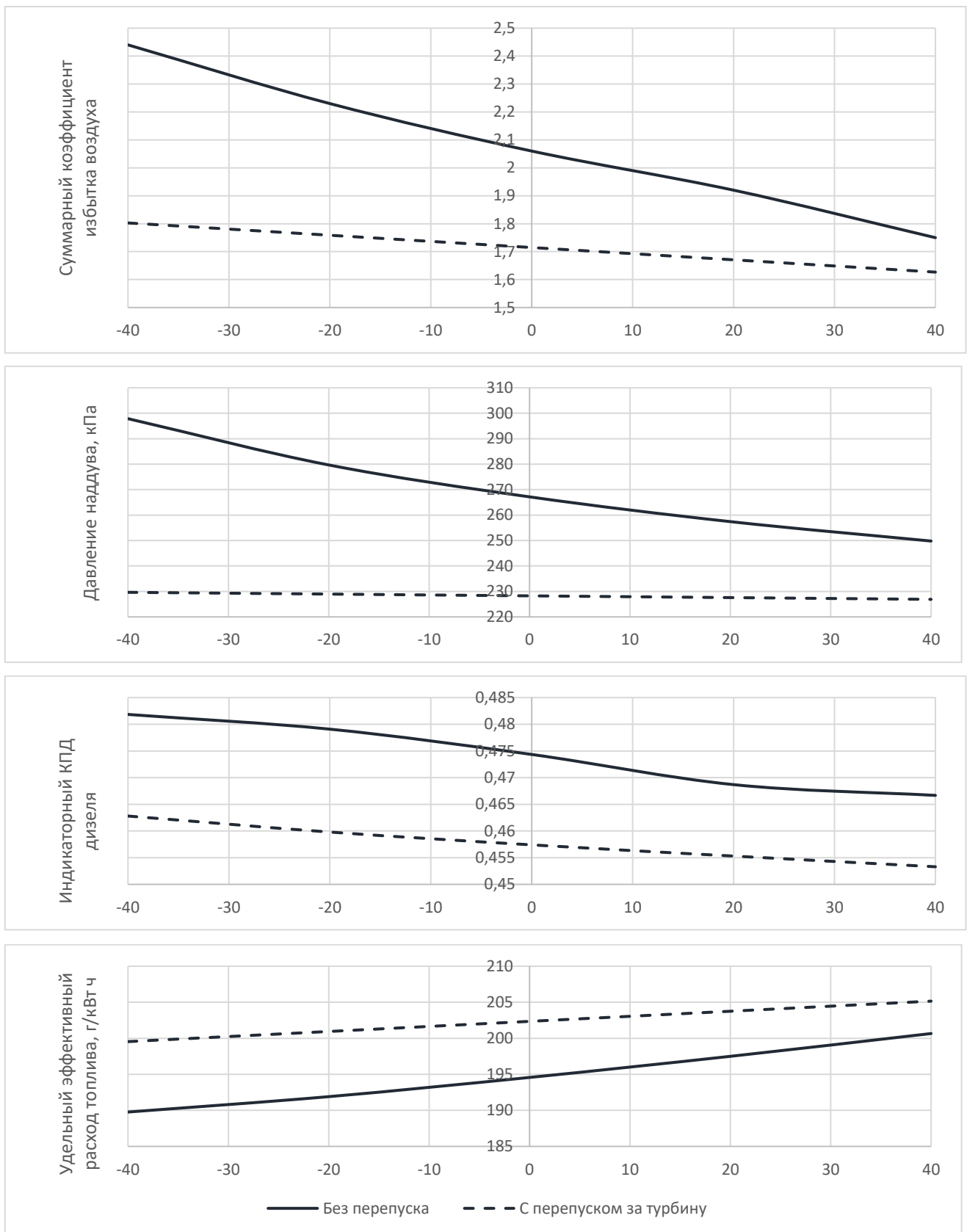


Рисунок 9 - Результаты моделирования

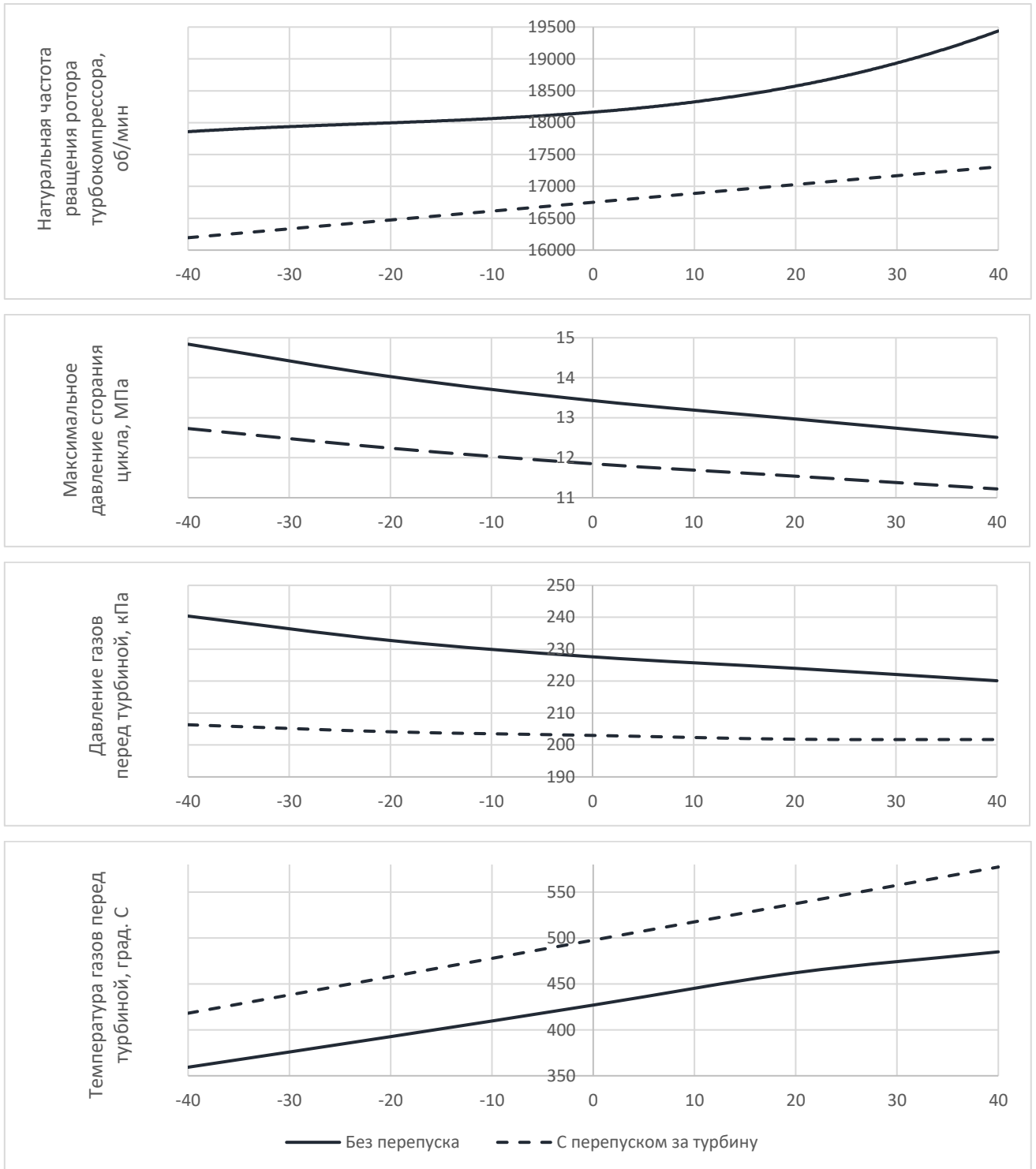


Рисунок 10 - Результаты моделирования

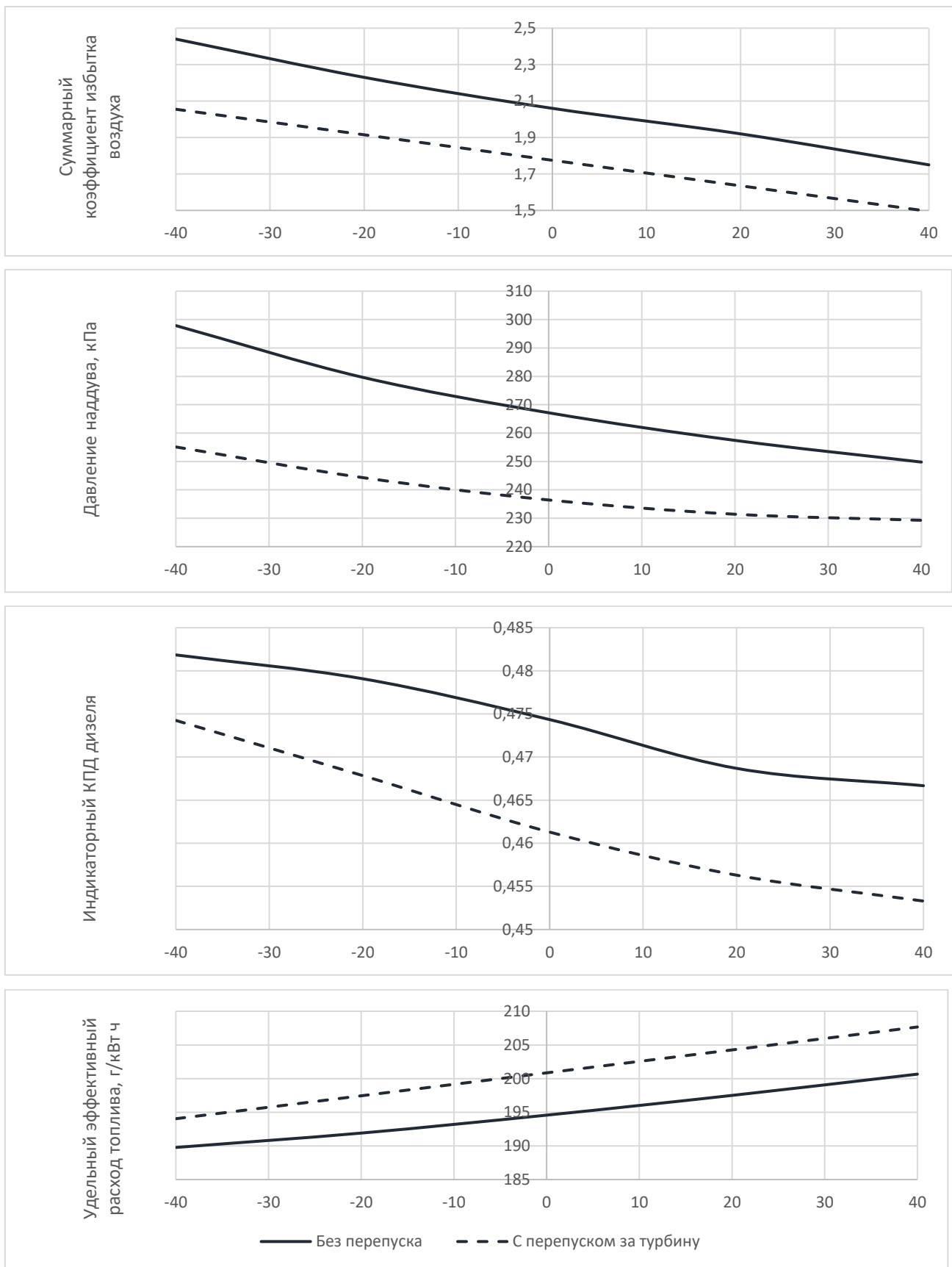


Рисунок 11 - Результаты моделирования

3. снижается максимальное давление сгорания цикла на 11,4-16,5 %;
4. повышается температура отработавших газов перед турбиной на 16,3-19,0%;
5. снижается суммарный коэффициент избытка воздуха на 12,1-17,0 %;
6. повышается удельный эффективный расход топлива на 2,2-3,4 %.

Увеличение коэффициента запаса устойчивой работы составило 4,8-5,1 %.

### 3.2 Результаты моделирования поездной работы тепловозов, оборудованных электронной системой управления силовой установкой

Для имитации поездной операции согласно приведенному в п. 2.4 алгоритму было задано множество (20), содержащее следующие обобщенные режимы ведения поезда:

- разгон;
- торможение;
- движение в режиме выбега;
- движение с постоянной скоростью.

$$A = \{ P, T, B, П \}. \quad (20)$$

В качестве исходных данных о времени работы тепловоза по позициям контроллера машиниста были приняты результаты опытных поездок тепловозов серии 2ТЭ116У на различных участках Свердловской, Октябрьской и Приволжской железных дорог [85, 86].

Для решения поставленных в Главе 3 цели и задач численного исследования было произведено моделирование работы дизелей типа 16ЧН26/26 с различными вариантами систем управления нагрузкой и наддувом,

выбранными в п. 3.1. Перепуск рабочего тела имитировался при температуре наружного воздуха ниже минус 30 °С.

При расчете поездной операции было учтено влияние изменения средней суточной температуры воздуха в течение года [87]. Гистограммы вероятности изменения средней суточной температуры воздуха в течение года для умеренного и холодного типов климата представлены на рисунках 12 и 13 соответственно.

Из рисунка 12 видно, что для умеренного типа климата невозможна количественная оценка влияния систем управления нагрузкой и наддувом дизеля. Это обстоятельство объясняется низкой (0,2 %) вероятностью наступления температурного режима, для которого требуется регулирование наддува.

Для количественной оценки влияния систем перепуска выбран холодный тип климата. Для этого типа вероятностью наступления температурного режима, для которого требуется регулирование наддува, в течение года составляет 6,7 %. В таблице 10 приведены показатели поездной работы тепловоза серии 2ТЭ116 с дизель-генераторной установкой 18-9ДГ, приведенные к часу работы.

Таблица 10 - Результаты расчета показателей поездной работы

№ п/п	Параметр	Вариант настройки ДГУ и ТК				
		№1	№2	№3	№4	№5
1	Выполненная работа, МДж	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6
2	Суммарный расход топлива, кг	112,7	109,1	109,0	109,4	109,2

Анализ таблицы 10 показывает, что суммарный расход топлива при применении систем перепуска рабочего тела не зависимо от варианта соизмерим с вариантом № 2, не требующим установки устройств перепуска рабочего тела. Таким образом, наибольшую эффективность имеет вариант № 2, не предусматривающий установки устройств перепуска рабочего тела и

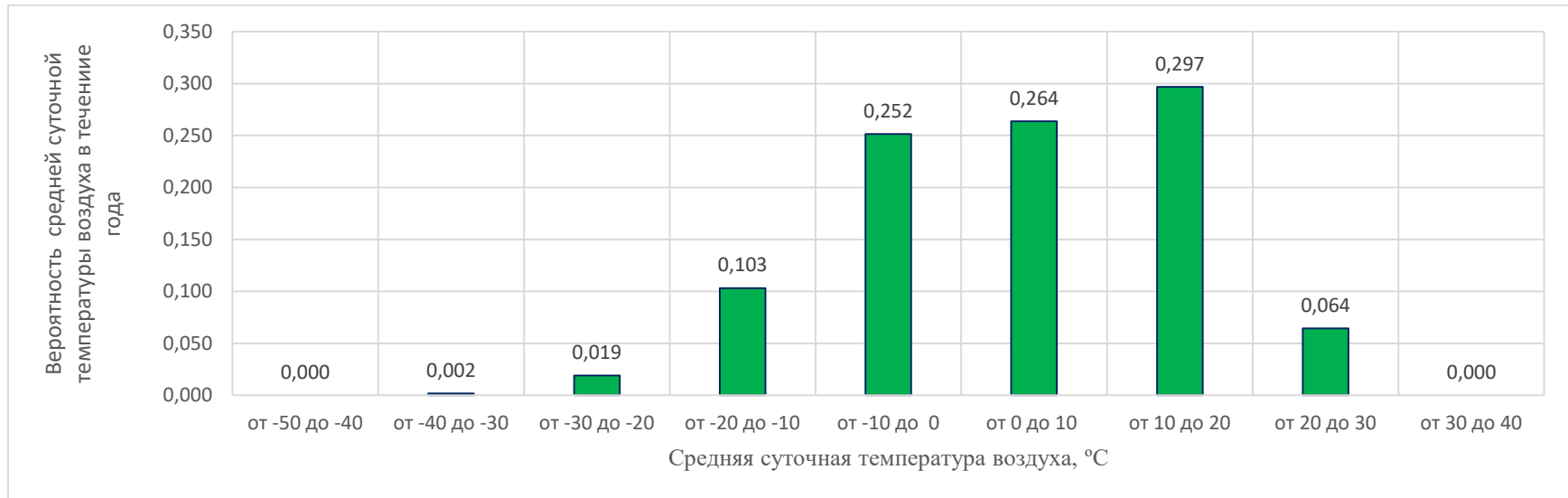


Рисунок 12 - Изменение средней суточной температуры воздуха в течение года (умеренный тип климата)

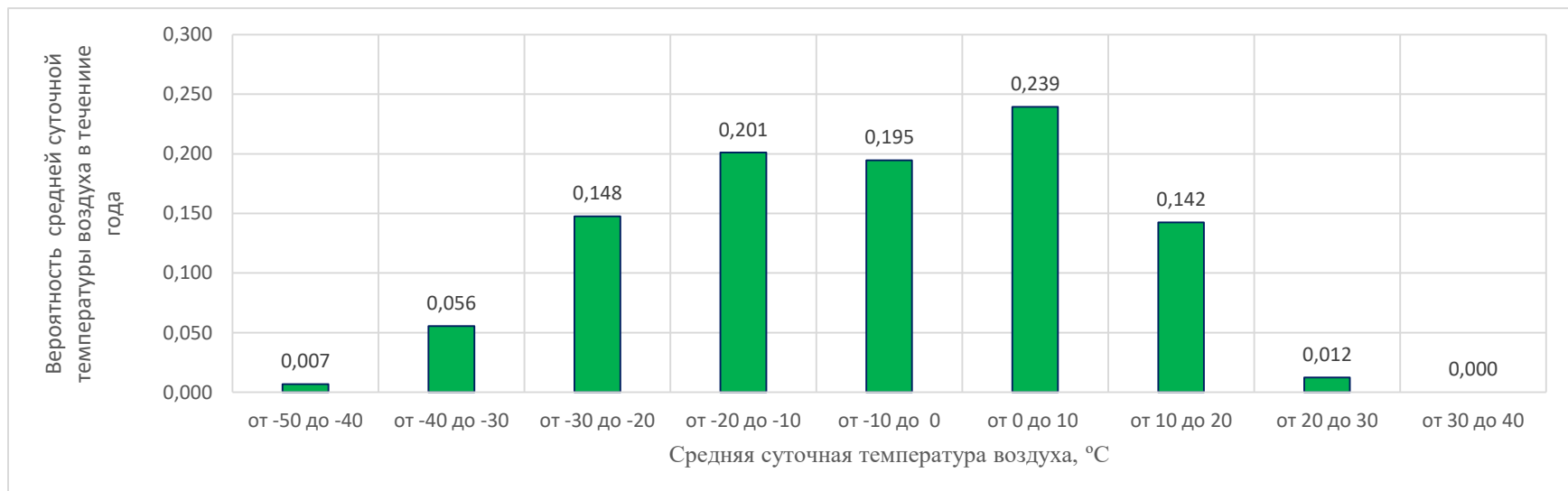


Рисунок 13 - Изменение средней суточной температуры воздуха в течение года (холодный тип климата)

обеспечивающий устойчивую работу дизель-генераторной установки тепловоза в широком диапазоне изменения атмосферных условий.

### 3.3 Анализ результатов эксплуатационных испытаний тепловозов, оборудованных электронными системами управления силовой установкой

Опытно-конструкторские работы и поисковые исследования, выполненные ОАО «ВНИИЖТ» совместно с ООО «ППП Дизельавтоматика» в инициативном порядке в 2010-2012 годах в области повышения топливной экономичности дизелей маневровых тепловозов показали возможность снижения эксплуатационных расходов за счет применения системы электронного управления подачей топлива (ЭСУВТ), которая позволяет обеспечить гибкое управление законом топливоподачи и высокие давления впрыска в широком диапазоне изменения частоты вращения и мощности двигателя. Опыт применения ЭСУВТ на маневровых тепловозах ТЭМ2, ТЭМ18 и ЧМЭЗ ОАО «РЖД» в 2012-2015 гг. подтвердил возможность повышения топливной экономичности дизеля на 5-7 % за счет снижения минимально-устойчивой частоты вращения при сохранении неизменными всех прочих эксплуатационных показателей [84].

С целью проверки эффективности системы электронного управления частотой вращения коленчатого вала, мощностью тяговой передачи и системой наддува (ЭСУТПН) дизель-генератора тепловоза 2ТЭ116 в 2014-2016 гг. проведены сравнительные реостатные и эксплуатационные испытания тепловоза серии 2ТЭ116 № 1733, оборудованного электронной системой ЭСУТПН. Испытания проведены в эксплуатационном локомотивном депо Саратов Приволжской Дирекции тяги ОАО «РЖД» по Программе и методике

эксплуатационных испытаний, разработанной ОАО «ВНИИЖТ» и согласованной со структурными подразделениями ОАО «РЖД».

Для повышения удельных и экологических показателей ДГУ АО «ВНИИЖТ» совместно с ООО «ППП Дизельавтоматика» был предложен усовершенствованный алгоритм задания мощности в зависимости от изменения температуры окружающего воздуха:

- машинист устанавливает позицию контроллера управления;
- в зависимости от температуры наружного воздуха система устанавливает заданную угловую скорость вращения коленчатого вала и продолжительность подачи топлива в цилиндры дизеля при включении нагрузки;
- до смены позиции контроллера система поддерживает выбранную частоту вращения и продолжительность подачи топлива.

На первой позиции контроллера машиниста устанавливается мощность на клеммах выпрямительной установки 100 кВт при частоте вращения коленчатого вала 350 об/мин. На всех других позициях заданная мощность определяется по зависимости:

$$P_{BY} = c_{12} + c_{13} \cdot (n_K - 1), \quad (21)$$

где  $c_{12} - c_{13}$  - постоянные коэффициенты;  $P_{BY}$  - мощность тягового генератора на клеммах выпрямительной установки;  $n_K$  - номер позиции контроллера машиниста.

Заданная частота вращения коленчатого вала определяется по величине заданной мощности  $P_{BY}$  по следующим зависимостям:

- при температуре наружного воздуха от плюс 20 до минус 20 °С:

$$\omega_{\partial} = \begin{cases} c_{14} + c_{15} \cdot (P_{BY} - c_{16}), & 100 < P_{BY} \leq 700, \\ c_{17} + c_{18} \cdot (P_{BY} - c_{19}), & P_{BY} > 700 \end{cases}, \quad (22)$$

- при температуре наружного воздуха от плюс 20 до плюс 40 °С и от минус 20 до



минус 40 °С:

$$\omega_{\partial} = \begin{cases} c_{20} + (c_{21} + c_{22} \cdot (T_0 - c_{23})) \cdot (P_{BY} - c_{24}), & 100 < P_{BY} \leq 700 \\ c_{25} + c_{26} \cdot (T_0 - c_{27}) + (c_{28} + c_{29} \cdot (T_0 - c_{30})) \cdot (P_{BY} - c_{31}), & P_{BY} > 700 \end{cases}, \quad (23)$$

где  $c_{14} - c_{31}$  - постоянные коэффициенты.

При этом ДГУ может работать по полю тепловозных характеристик в зависимости от температуры наружного воздуха. В таблице 11 приведено изменение заданных величин мощности и частоты вращения коленчатого вала дизеля в зависимости от температуры наружного воздуха при работе по штатной и опытной скоростным характеристикам.

Разработка, изготовление и установка опытных образцов систем управления подачей топлива, нагрузкой и наддувом на тепловозах на различных этапах эксплуатационных испытаний выполнялась ООО «ППП Дизельавтоматика», ОАО «Пензадизельмаш», ООО «Специальное конструкторское бюро турбонагнетателей», АО «ВНИИЖТ».

Разработка, изготовление и установка опытных образцов электронных систем и агрегатов на тепловозе 2ТЭ116 № 1733 выполнялись специалистами АО «ВНИИЖТ», ООО «ППП Дизельавтоматика», ОАО «Пензадизельмаш» и ООО «СКБТ».

Очередность установки электронных систем ЭСУТПН, периоды и периодичность их эксплуатации на секции «А» тепловоза 2ТЭ116 № 1733 приведены в таблице 12. На секции «Б» сохранено оборудование в штатной комплектации.

Работоспособность и функционирование электронных систем, агрегатов наддува и алгоритмов управления и регулирования силовой установкой проверялись при проведении контрольных реостатных испытаний по мере готовности систем при поочередной установке их на тепловозе.

Таблица 11 - Заданные величины мощности и частоты вращения коленчатого вала ДГУ 18-9ДГ при работе по штатной и опытной скоростным характеристиках

Позиция контроллера	штатная		опытная				
	$P_{B\gamma}$ , кВт	$\omega_D$ , об/мин	$P_{B\gamma}$ , кВт	$\omega_D$ , об/мин			
				$\leq 20$ °C	21 °C	30 °C	40 °C
I	100±20	350	100	350	350	350	350
II	200±40	470	250	402,5	404	417	431
III	340±40	590	400	455	458	484	512
V	770±40	735	700	560	566	617,5	675
VII	1070±40	790	1000	618	624	679	739
IX	1230±40	820	1300	676	682,7	740,5	804
XI	1550±40	875	1600	734	741	802	869
XIII	1920±40	940	1900	792	799	863	935
XV	2244±40	1000	2200	850	857	925	1000,5

Таблица 12 - Информация об оборудовании тепловоза 2ТЭ116 № 1733

№ п/п	Период эксплуатации	Варианты комплектации систем дизеля и тепловоза			Наработка в эксплуатации, км
		Подачи топлива	Наддува	Нагрузки	
1	04.04.2014 – 01.07.2014	ЭСУВТ	штатная	штатная	9 369,9
2	15.07.2014 – 08.09.2014	ЭСУВТ	ТК32-20-01	штатная	5 306,6
3	10.09.2014 – 06.11.2014	ЭСУВТ	ТК32-20-01	штатная	6 271,6
4	19.11.2014 – 04.02.2015	ЭСУВТ	ТК35В-36	штатная	7 808,9
5	10.02.2015 – 16.04.2015	ЭСУВТ	ТК35В-36	2-х скоростная	6 706,5
Итого					35 463,5

В интервалах между контрольными реостатными испытаниями секции «А» тепловоз 2ТЭ116 № 1733 эксплуатировался в смешанной работе на участках обращения Саратовского узла.

В ходе испытаний было установлено, что спроектированная и изготовленная ОАО «Пенздизельмаш» система регулирования наддува турбокомпрессора ТК32-20-01 в эксплуатации оказалась неработоспособной из-за неполного закрытия перепускного клапана и в ноябре 2014 г. была демонтирована с тепловоза вместе с турбокомпрессором. В процессе демонтажа было подтверждено, что перепускной клапан заклинен вследствие его загорания и полностью неработоспособен. Устройство перепуска с заклинившим клапаном приведено на рисунках 14 и 15.

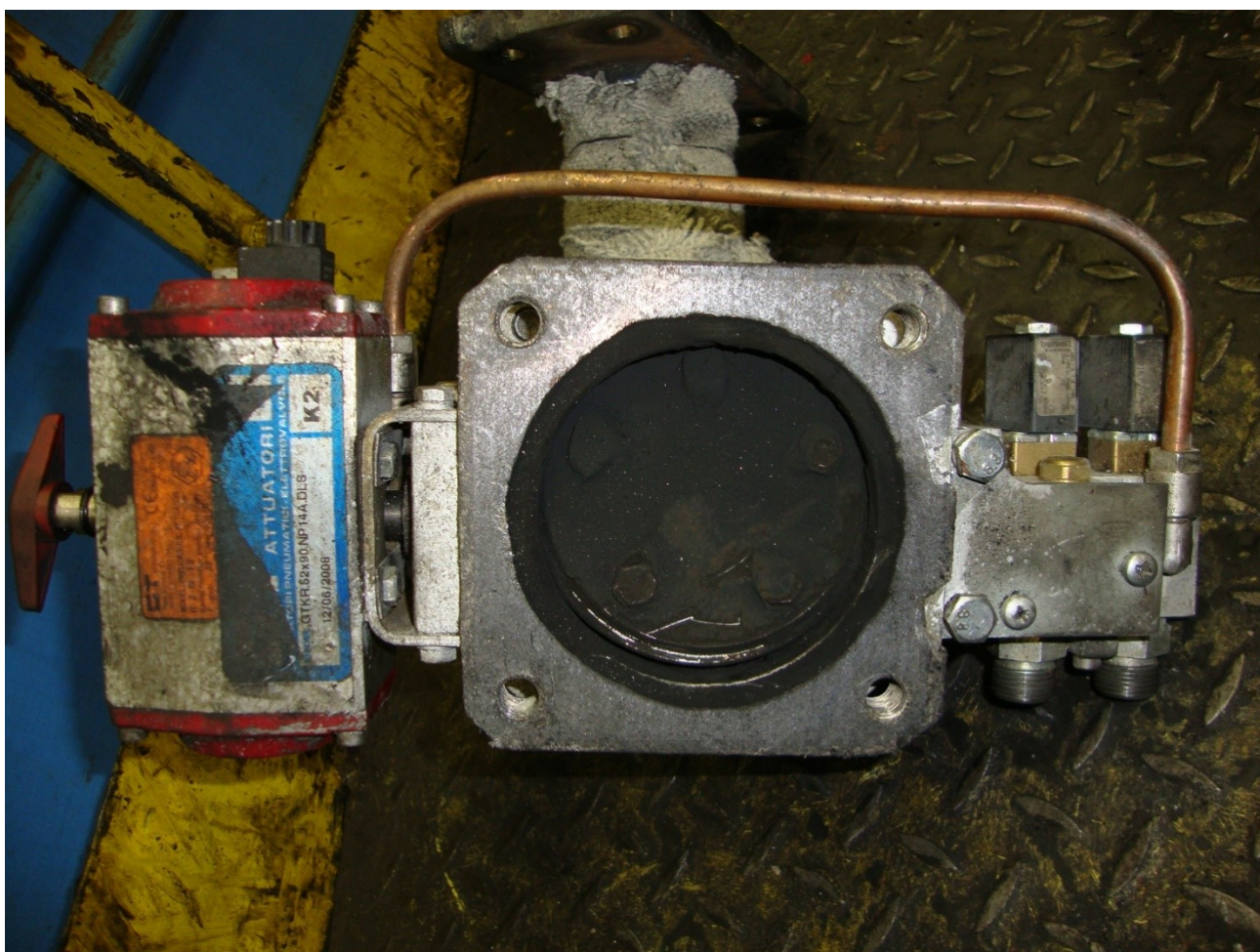


Рисунок 14 - Устройство перепуска воздуха с заклинившим клапаном



Рисунок 15 - Заклинивший клапан перепуска

Заклинивание перепускного клапана привело к забросу выхлопных газов в охладитель наддувочного воздуха, что привело к практически полному (примерно на 85%) закоксование охлаждающих трубок и входного сечения охладителя наддувочного воздуха. Внешний вид охлаждающих трубок и входного сечения охладителя наддувочного воздуха до промывки приведен на рисунках 16 и 17. В бортовом журнале локомотива формы ТУ-152 имеются записи локомотивных бригад о дымной работе силовой установки секции «А» и невозможности реализации установленной мощности по позициям контроллера (400 кВт вместо 1700 кВт при работе на 13 позиции контроллера). Для удаления загрязнений из проточной части охладителя наддувочного воздуха и



Рисунок 16 - Внешний вид охлаждающих трубок охладителя наддувочного воздуха до промывки

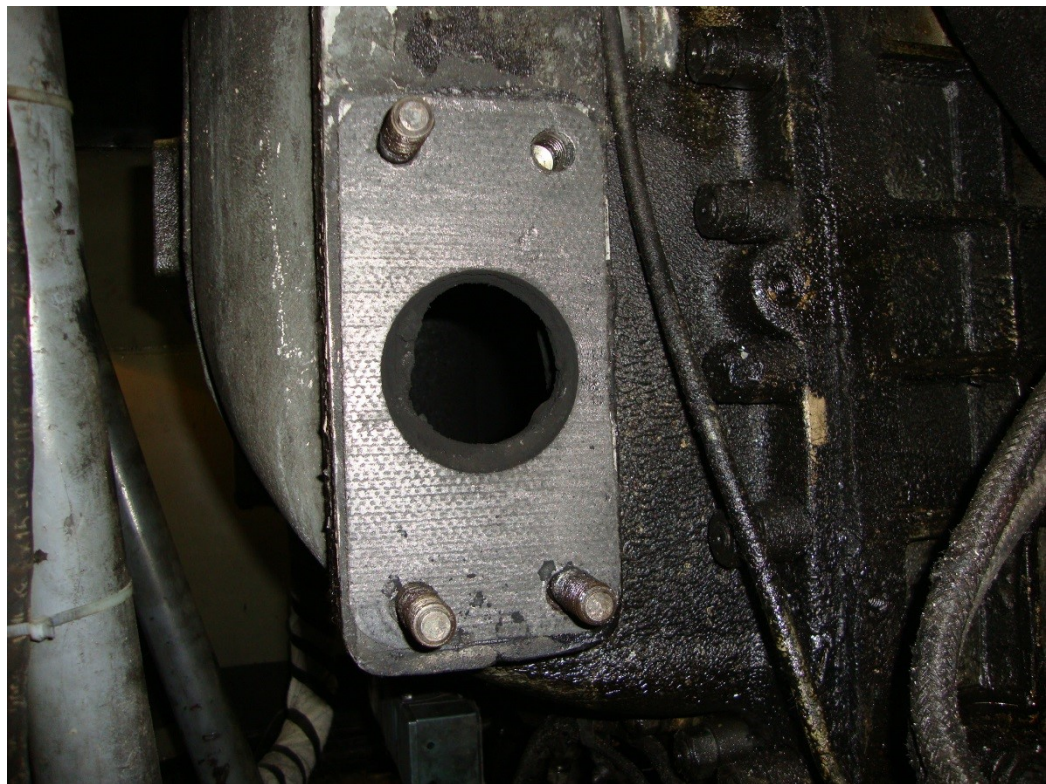


Рисунок 17 - Входное сечение охладителя наддувочного воздуха

восстановления его работоспособности потребовался демонтаж охладителя и многократная промывка его в моечной машине. Фотоматериалы по демонтажу и промывке охладителя приведены в приложении Д.

После демонтажа турбокомпрессора ТК32-20-01 на дизель был установлен турбокомпрессор ТК35В-36 производства ООО «СКБТ». Взамен изготовленной ОАО «Пенздизельмаш» системы регулирования наддува была смонтирована разработанная и изготовленная ООО «ППП Дизельавтоматика» совместно с ОАО «ВНИИЖТ» система регулирования наддува, обеспечивающая защиту от помпажа компрессора и превышения частоты вращения ротора турбокомпрессора за счет регулирования нагрузки дизеля и перепуска воздуха за турбину турбокомпрессора. При проведении реостатных испытаний была проверена функциональная работоспособность системы, однако в процессе эксплуатации условий для срабатывания системы перепуска не зафиксировано.

Применение электронных систем управления подачей топлива, наддувом и нагрузкой при испытаниях опытного тепловоза 2ТЭ116 № 1733 подтвердила:

- обеспечение длительной устойчивой работы силовой установки по штатной и полю опытных скоростных характеристик;
- снижение среднеэксплуатационного расхода топлива в зависимости от режимов загрузки двигателя тепловоза;
- эффективность системы управления частотой вращения коленчатого вала, мощностью тяговой передачи и системой наддува дизель-генератора, исключающей достижение предельных значений параметров, регламентируемых ТУ на поставку.

После проведения эксплуатационных и контрольных реостатных испытаний с секции «А» тепловоза 2ТЭ116 № 1733 электронная система ЭСУТПН была демонтирована при проведении среднего ремонта.

В рамках реализации инвестиционного проекта ОАО «РЖД» «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте» в 2016 г. при

техническом сопровождении АО «ВНИИЖТ» проведено оборудование 10 секций тепловозов серии 2ТЭ116 №№ 1362, 1733, 1737, 1738, 1744 Приволжской Дирекции тяги системой электронной системой ЭСУТПН. Установка проводилась в сервисном локомотивном депо Саратов ООО «ТМХ-Сервис» филиал «Южный» при участии специалистов ООО «ППП Дизельавтоматика», ООО «Специальное конструкторское бюро турбонагнетателей» и работников сервисного локомотивного депо. На рисунках 18-20 приведены основные элементы электронной системы ЭСУТПН в процессе оборудования.

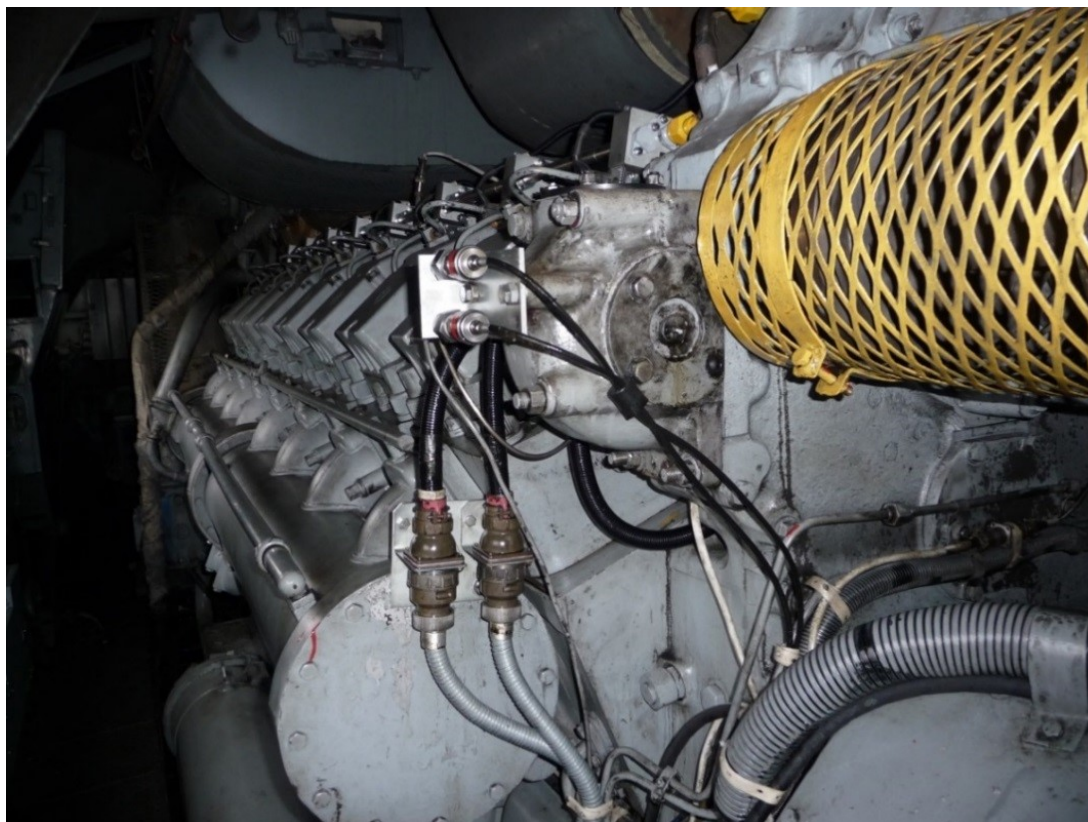


Рисунок 18 - Электроуправляемые топливные насосы высокого давления, датчики давления наддувочного воздуха и масла системы ЭСУТПН





Рисунок 19 - Блоки управления и питания системы ЭСУТПН



Рисунок 20 - Электроуправляемые топливные насосы высокого давления и турбокомпрессор ТК35В-36 системы ЭСУТПН

После установки электронных систем ЭСУТПН на 10 секциях тепловозов серии 2ТЭ116 проведены контрольные реостатные испытания, которые подтвердили возможность обеспечения длительной устойчивой работы силовой установки по штатной скоростной характеристике и полю опытных скоростных характеристик с пониженной номинальной частотой вращения коленчатого вала дизеля. Результаты контрольных реостатных испытаний приведены в таблицах 13-15 в сравнении с параметрами тепловозов серий 2ТЭ116, 2ТЭ116У и 2ТЭ116УД в штатной комплектации. Анализ таблиц 13-15 показывает, что по технико-экономическим показателям тепловозы, оборудованные электронной системой ЭСУТПН, не уступает тепловозам указанных выше серий в штатной комплектации.

В настоящее время тепловозы, оборудованные электронной системой ЭСУТПН, эксплуатируются в грузовом, вывозном и хозяйственном видах движения Приволжской Дирекции тяги. По состоянию на 14.03.2018 г., согласно данным электронной системы АСУТ-ЦТ, все тепловозы находятся в исправном состоянии. Срабатываний системы регулирования наддува путем перепуска воздуха от компрессора на вход в турбину за 20 месяцев не зафиксировано.

### 3.4 Выводы по разделу 3

1. Предложенная система управления частотой вращения коленчатого вала, мощностью тяговой передачи и системой наддува силовой установки тепловоза позволяет повысить топливную экономичность силовой установки за счет расширения области рабочих режимов дизеля и повышения управляемости двигателя по топливоподаче, газораспределению и наддуву.
2. Анализ результатов расчета характеристик дизеля при работе по опытной тепловозной характеристике в диапазоне температур от минус 40 °С до плюс 40 °С показал, что при температуре наружного воздуха ниже минус 30 °С

необходимо внедрение мероприятий, обеспечивающих удаление линии рабочих режимов от ограничительной линии устойчивой работы.

3. Обобщение и анализ результатов воспроизведения поездной работы магистрального грузового тепловоза показали, что наибольшую эффективность имеет вариант № 2, не требующий установки устройств перепуска рабочего тела и обеспечивающий устойчивую работу дизель-генераторной установки тепловоза в широком диапазоне изменения атмосферных условий

4. Проведены эксплуатационные испытания тепловозов, оборудованных электронными системами управления нагрузкой и наддувом. Испытания показали:

- обеспечение длительной устойчивой работы силовой установки по штатной и опытной скоростным характеристикам;
- снижение среднеэксплуатационного расхода топлива в зависимости от режимов загрузки двигателя тепловоза;
- эффективность системы управления частотой вращения коленчатого вала, мощностью тяговой передачи и системой наддува дизель-генератора, исключающей достижение предельных значений параметров, регламентируемых ТУ на поставку;
- срабатываний клапанов системы регулирования наддува путем перепуска воздуха от компрессора на вход в турбину в эксплуатации с 2017 г. не зафиксировано.

Таблица 13 - Сравнение основных параметров ДГУ, установленных на тепловозах 2ТЭ116 в штатной комплектации и на тепловозах 2ТЭ116 с ЭСУТПН

№ п/п	Параметр по ТУ	Ед. измерения	Значение по 2ТЭ116	Значения по тепловозу 2ТЭ116 №1362 с ЭСУВТ.03
1	Основание для сравнения		ТУ24.04.532-88	Результаты реостатных испытаний в СЛД Саратов «ТМХ-Сервис»
2	Тип дизель-генераторной установки	-	1-А9ДГ исп.2-01	1-А9ДГ исп.2
3	Обозначение дизеля по ГОСТ 10150		16 ЧН26/26	
4	Частота вращения коленчатого вала на полной мощности	об/мин	1000	Двухскоростная характеристика 1000/850
5	Частота вращения коленчатого вала, минимально-устойчивая	об/мин	350	350/280
6	Полная мощность ДГУ на клеммах выпрямительной установки	кВт	2085	1990/2018 (850)
7	Удельный расход топлива	г/кВт ч	213,3+10,66	217,0/214,0
8	Расход топлива на холостом ходу на нулевой позиции контроллера	кг/час	14,4	13,9/10,9 (350/280)
9	Максимальное давление сгорания	МПа	12,0	12,4/12,4
10	Давление наддувочного воздуха в ресивере диеля	кПа	1,32-1,52	1,86/1,84 (850)
11	Средняя температура газов на выходе из цилиндров дизеля	°С	580	428/443

Таблица 14 - Сравнение основных параметров ДГУ, установленных на тепловозах 2(3) ТЭ116У в штатной комплектации и на тепловозах 2ТЭ116 с ЭСУТПН

№ п/п	Параметр по ТУ	Ед. измерения	Значение по 2ТЭ116У	Значения параметров по тепловозам с ЭСУВТ.03			
				1733	1737	1738	1744
1	Основание для сравнения		ТУ24.04532-87	Результаты реостатных испытаний в СЛД Саратов «ТМХ-Сервис»			
2	Тип дизель-генераторной установки	-	18-9ДГ				
3	Обозначение дизеля по ГОСТ 10150		16 ЧН26/26				
4	Частота вращения коленчатого вала на полной мощности	об/мин	1000	Двухскоростная характеристика 1000/850			
5	Частота вращения коленчатого вала, минимально-устойчивая	об/мин	350	350/280			
6	Полная мощность ДГУ на клеммах выпрямительной установки	кВт	2460	2402/ 2416 (850)	2371/ 2334 (850)	2386/ 2408 (850)	2408/ 2385 (850)
7	Удельный расход топлива	г/кВт ч	213,3+10,66	218,4/ 221,4 (850)	-		-
8	Расход топлива на холостом ходу на нулевой позиции контроллера	кг/час	14,0	13,4/ 10,8 (280)	-	-	-
9	Максимальное давление сгорания	МПа	14,0	13,8/ 13,8 (850)	14,6/ 14,0 (850)	14,3/ 14,6 (850)	14,1/ 13,8 (850)
10	Давление наддувочного воздуха в ресивере диеля	кПа	-	1,58/ 1,77 (850)	1,69/ 1,70 (850)	1,63/ 1,65 (850)	1,76/ 1,73 (850)
11	Средняя температура газов на выходе из цилиндров дизеля	°С	580	443/ 449 (850)	426/ 430 (850)	435/ 429 (850)	445/ 449 (850)

Таблица 15 - Сравнение основных параметров ДГУ, установленных на тепловозах 2ТЭ116УД в штатной комплектации и на тепловозах 2ТЭ116 с ЭСУТПН

№ п/п	Параметр по ТУ	Ед. измерения	Значение по 2ТЭ116УД	Значения параметров по тепловозам с ЭСУВТ.03			
				1733	1737	1738	1744
1	Основание для сравнения		ТУ24.04.532-87	Результаты реостатных испытаний в СЛД Саратов «ТМХ-Сервис»			
2	Тип дизель-генераторной установки	-	GEVO12	18-9ДГ			
3	Обозначение дизеля по ГОСТ 10150		12ЧН25/32	16 ЧН26/26			
4	Частота вращения коленчатого вала на полной мощности	об/мин	1050	Двухскоростная характеристика 1000/850			
5	Частота вращения коленчатого вала, минимально-устойчивая	об/мин	440	350/280			
6	Полная мощность ДГУ на клеммах выпрямительной установки	кВт	2924	2402/ 2416 (850)	2371/ 2334 (850)	2386/ 2408 (850)	2408/ 2385 (850)
7	Удельный расход топлива	г/кВт ч	207,7+10,38	218,4/ 221,4 (850)	-		-
8	Расход топлива на холостом ходу на нулевой позиции контроллера	кг/час	14,0	13,4/ 10,8 (280)	-	-	-
9	Максимальное давление сгорания	МПа	14,0	13,8/ 13,8 (850)	14,6/ 14,0 (850)	14,3/ 14,6 (850)	14,1/ 13,8 (850)
10	Давление наддувочного воздуха в ресивере диеля	кПа	-	1,58/ 1,77 (850)	1,69/ 1,70 (850)	1,63/ 1,65 (850)	1,76/ 1,73 (850)
11	Средняя температура газов на выходе из цилиндров дизеля	°С	620	443/ 449 (850)	426/ 430 (850)	435/ 429 (850)	445/ 44950)

## 4 Технико-экономическая оценка эффективности применения электронной системы управления силовой установкой

### 4.1 Общие положения

Расчет экономического эффекта от применения электронных систем управления выполнен в соответствии с методическими положениями и рекомендациями, изложенными в «Методике оценки технико-экономической эффективности применения электронной системы управления силовой установкой, включая управления нагрузкой, подачей топлива и наддувом» ТПС04.2ТЭ116.ЭСУТПН М39, разработанной ОАО «ВНИИЖТ» и согласованной со структурными подразделениями ОАО «РЖД».

При выполнении технико-экономического обоснования учтены положения и рекомендации, изложенные в следующих нормативных документах:

- «Типовые требования к составлению технико-экономического обоснования», утвержденные Департаментом технической политики ОАО «РЖД» от 08.12.2006 г.;

- «Методика расчета и подтверждения экономического эффекта от использования результатов научно-технических работ в деятельности ОАО «РЖД», утвержденная Распоряжением ОАО «РЖД» от 30.12.2008 г. № 2886р;

- «Методика определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта», утвержденная Распоряжением ОАО «РЖД» от 27.12.2007 г. № 2459р;

- «Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте», утвержденные Указанием МПС РФ от 31.08.1998 г. № В-1024у;

- «Методические рекомендации по обоснованию эффективности инноваций на железнодорожном транспорте», утвержденные Департаментом технической политики МПС РФ от 26.04.1999 г. № ЦТехО-11 [94];

- «Положение о системе технического обслуживания и ремонта локомотивов ОАО «РЖД», утвержденное Распоряжением ОАО «РЖД» от 17.01.2005 г. № 3р;

- «Руководство по техническому обслуживанию и текущему ремонту тепловозов 2ТЭ116» ТЭ116 ИО, утвержденное ОАО «РЖД» 31.12.2004 г.

Целью расчета явилось оценка экономического эффекта от применения электронных систем управления дизеля. В качестве базового варианта принят вариант № 1, в качестве сравниваемых – варианты 2 и 3. В расчете не рассмотрены варианты 4 и 5, так как эти варианты имеют сопоставимую стоимость системы перепуска рабочего тела с вариантом № 3 и заведомо больший суммарный расход топлива.

Стоимостная оценка экономического эффекта выполнена на основе соизмерения затрат и полученных результатов. В качестве затрат рассмотрены капитальные затраты на приобретение и монтаж электронных систем, в качестве результатов – экономия расходов, обеспечиваемая применением электронных систем управления подачей топлива, наддувом и нагрузкой дизель-генератора.

Основными эффектообразующими факторами применения электронных систем управления ДГУ являются:

- экономия дизельного топлива;
- экономия моторного масла;
- сокращение затрат на экипировку;
- сокращение расходов оплаты за выбросы вредных веществ;
- сокращение затрат на ТО и ТР.

Стоимостная оценка изменения эффектообразующих факторов использования электронных систем управления ДГУ определяется по методу



единичных и укрупненных расходных ставок, отнесенных к соответствующим измерителям эксплуатационной работы [102]. Укрупненные и единичные расходные ставки определяются в соответствии с Методикой и организацией расчета укрупненных и единичных расходных ставок в условиях структурной реформы ОАО «РЖД», утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 07 июля 2008 г. № 1426р.

Расчет выполнен в ценах и нормативах, предоставленных Росжелдорснаб и Приволжской Дирекцией тяги и актуальных на 2 квартал 2016 г.

Расчет подлежит уточнению при изменении технического состояния тепловозов 2ТЭ116, оборудованных электронными системами.

#### 4.2 Исходные данные для расчета

Единовременные затраты на приобретение и монтаж электронных систем приняты согласно представленных фирмами-производителями калькуляций, и сведены в таблицу 16.

При учете стоимости штатного оборудования принимается вариант 100 % остаточной стоимости комплекта штатных деталей и узлов, заменяемых при монтаже электронных систем.

Номенклатура деталей и узлов из состава штатного оборудования, заменяемых при монтаже электронных систем ДГУ и их стоимости при изготовлении по состоянию на 01.10.2016 г., приведены в таблице 17.

#### 4.3 Методика расчета технико-экономической эффективности

В работе критерием эффективности использования электронных систем ДГУ на локомотивах ОАО «РЖД» принят показатель максимальной доходности

Таблица 16 - Единовременные затраты на приобретение и монтаж электронных систем

№ п/п	Наименование работ и услуг	Подрядчик	Стоимость ед., руб. (без НДС)	
			Вариант 3, 4, 5	Вариант 2
1	Изготовление и поставка электронной системы ЭСУВТ.03	ООО «ППП Дизельавтоматика» (г. Саратов)	1 804 414-00	1 804 414-00
1.1	В том числе механизм перепуска наддувочного воздуха МПНВ.01		150 000-00	-
2	Изготовление и поставка турбокомпрессора ТК35В- 36	ООО «СКБТ» (г. Пенза)	1 220 000-00	1 220 000-00
3	Демонтаж штатного оборудования, монтаж электронных систем и ТК35В-36 на тепловозе	АО «ВНИИЖТ», (г. Москва)	894 413-40	802 193-40
Итого			3 918 827-40	3 676 607-40

Таблица 17 - Остаточная стоимость штатного оборудования

№ п/п	Наименование детали или сборочной единицы	Обозначение, чертеж	Количество на дизель, шт.	Цена за единицу, руб. без НДС
1	Топливный насос высокого давления (ТНВД)	Д49.107спч-4	16	35 709-43
2	Турбокомпрессор	6ТК12.00.000	1	1 208 925-17
3	Регулятор наддува предельный	7РН.спч-4	1	92 806-45
4	Труба от регулятора наддува	18-9ДГ.185.8спч	1	3 822-28
5	Электронный регулятор частоты вращения и мощности (ЭРЧМ)	ЭРЧМ30Т3-02	1	313 350-00
6	Блок управления	ЭРЧМ БУ30Т3-10	1	36 173-92
7	Механизм управления топливными насосами	2-9ДГ.108спч-01	1	95 389-14
8	Топливопровод низкого давления	3-9ДГ.196.спч-04	комплект	84 209-07
Итого				2 406 027-00

(прибыльности) [94]. Основным показателем доходности принята величина чистого дисконтированного дохода (ЧДД) или интегрального эффекта, рассчитываемого как превышение стоимостных результатов от внедрения электронных систем над затратами за расчетный период с учетом фактора времени.

Коммерческая эффективность использования электронных систем управления нагрузкой и наддувом определялась соотношением финансовых затрат и результатов, обеспечивающих требуемую норму доходности. В качестве затрат при расчете экономического эффекта рассмотрены стоимостные показатели электронных систем управления нагрузкой и наддувом и текущего содержания их на тепловозе, в качестве результатов – экономия годовых текущих расходов от применения электронных систем.

Экономическая эффективность применения электронных систем управления нагрузкой и наддувом на тепловозе оценена показателями:

- чистый доход (ЧД);
- чистый дисконтированный доход или интегральный эффект (ЧДД);
- срок окупаемости инвестиций.

Величина чистого дохода за расчетный период, принятый равным сроку службы электронной системы ДГУ, определяется из выражения [95]:

$$\text{ЧД} = \sum_{t=0}^{T_{\text{сл}}} \Pi_t - \sum_{t=0}^{T_{\text{сл}}} K_{\Sigma} , \quad (24)$$

где  $\Pi_t$  – поток денежных средств в  $t$ -ом году применения системы;  $K_{\Sigma}$  – инвестиционные расходы в  $t$ -ом году на приобретение электронной системы ДГУ;  $t$  – текущий год эксплуатации электронной системы ДГУ.

Единовременные расходы содержат в себе непосредственно стоимость электронных систем ДГУ и затраты по ее монтажу:

$$K_{\Sigma} = K_t + K_{tm}, \quad (25)$$

где  $K_t$  – непосредственно текущая стоимость электронной системы ДГУ;  $K_{tm}$  – стоимость работ по монтажу электронной системы ДГУ.

Поток денежных средств определялся по формуле [95]:

$$\Pi_t = \mathcal{E}_r - \Delta N_{им.} - \Delta N_{пр.} + A, \quad (26)$$

где:  $\mathcal{E}_r$  – экономия годовых эксплуатационных расходов от применения электронной системы ДГУ на тепловозе в сравнении со штатным вариантом комплектации дизеля и тепловоза;  $\Delta N_{им.}$  – изменение налога на имущество в связи с осуществлением инвестиций на приобретение электронной системы ДГУ;  $\Delta N_{пр.}$  – изменение платежей по налогу на прибыль.

Экономия годовых эксплуатационных расходов от применения электронных систем на тепловозе, определялся по формуле [95]:

$$\mathcal{E}_r = \Delta U_T + \Delta U_M + \Delta U_{эк} + \Delta U_{тр} + \Delta U_{выб}, \quad (27)$$

где  $\Delta U_T$  – изменение эксплуатационных расходов на дизельное топливо;  $\Delta U_M$  – изменение эксплуатационных расходов на моторное масло;  $\Delta U_{эк}$  – снижение затрат на экипировку;  $\Delta U_{тр}$  – снижение расходов на обслуживание и ремонт тепловоза с электронными системами ДГУ при плановых видах ТО и ТР;  $\Delta U_{выб}$  – снижение расходов оплаты за выбросы вредных веществ.

Размер ежегодных амортизационных отчислений  $A$ , определялся по формуле [95]:

$$A = \frac{K_{\Sigma}}{T_{сл}}, \quad (28)$$

где  $K_{\Sigma}$  - единовременные расходы на приобретение электронной системы ДГУ;  $T_{сл}$  - срок службы электронной системы [88].

Величина чистого дисконтированного дохода за расчетный период, приведенная к начальному шагу по ставке дисконта, определялась по формуле [95]:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^{T_{\text{сд}}} \Pi_t \cdot \alpha_t - \sum_{t=0}^{T_{\text{сд}}} K_{\Sigma} \cdot \alpha_t, \quad (29)$$

где  $\alpha_t$  – коэффициент приведения разновременных затрат и результатов к расчетному году.

Коэффициент  $\alpha_t$  определялся по зависимости:

$$\alpha_t = 1/(1 + E_H)^t, \quad (30)$$

где  $t$  – номер шага расчета;  $E_H$  – ставка дисконтирования.

Срок окупаемости инвестиций или срок возврата вложений определялся из выражения [95]:

$$\sum_{t=0}^{T_{\text{ок}}} \Pi_t \cdot \alpha_t = \sum_{t=0}^{T_{\text{ок}}} K_t \cdot \alpha_t, \quad (31)$$

#### 4.4 Методика расчета эксплуатационных расходов

Экономия годовых эксплуатационных расходов за счет снижения расхода топлива определяется из выражения:

$$\Delta U_T = \Delta g \cdot G_T \cdot C_T, \quad (32)$$

где  $\Delta g$  – относительная годовая экономия затрат на дизельное топливо;  $G_T$  – общий годовой расход дизельного топлива;  $C_T$  – цена дизельного топлива.

Экономия годовых расходов за счет снижения расхода моторного масла в эксплуатации определялась из выражения:

$$\Delta U_M = \Delta g \cdot G_T \cdot \delta_M \cdot C_M, \quad (33)$$

где:  $\delta_M$  – расход моторного масла на угар, в процентах от расхода дизельного топлива;  $C_M$  – цена моторного масла.

Экономия годовых расходов на экипировку ГСМ определялась из выражения

$$\Delta U_{ЭК} = (\Delta g \cdot G_T + \Delta g \cdot G_T \cdot \delta_M) \cdot e_{ЭК}, \quad (34)$$

где  $e_{ЭК}$  – расходная ставка на экипировку.

Экономия годовых текущих расходов при проведении плановых видов ТО и ТР тепловозов 2ТЭ116 определялась выражением:

$$\Delta U_{ТО} = U_{ТО}^B - U_{ТО}^H, \quad (35)$$

где  $U_{ТО}^B$  – годовые эксплуатационные расходы на ТО и ТР штатного оборудования;  $U_{ТО}^H$  – годовые эксплуатационные расходы на ТО и ТР электронных систем ДГУ.

В общем виде годовые эксплуатационные расходы на обслуживание и ремонт как штатного оборудования, так и электронных систем ДГУ при проведении плановых видов ТО и ТР тепловоза определялись по формуле [96]:

$$\Delta U_{ТО} = \frac{1}{T_{ГР}} \cdot \sum_1^{T_{ГР}} n_i \cdot Z_i \cdot t_i \cdot \left(1 + \frac{k_1}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{k_2}{100}\right), \quad (36)$$

где  $n_i$  – количество ТО, ТР, СР и КР за срок службы электронной системы;  $Z_i$  – часовая тарифная ставка слесаря соответствующего разряда;  $t_i$  – трудоемкость технологических операций по видам ремонта;  $k_1$  – отчисления в пенсионный фонд, фонд занятости, соцстрах и обязательного медицинского страхования;  $k_2$  –

отчисления, учитывающие размер надбавок и премий;  $T_{ГР}$  – принятый горизонт расчета (срок службы).

Для организации и проведения планово-предупредительного ремонта тепловозов 2ТЭ116 с электронными системами использованы средние нормы периодичности технического обслуживания и ремонта, регламентированные распоряжением ОАО «РЖД» от 17.01.2005 г. № 3р «О системе технического обслуживания и ремонта локомотивов ОАО «РЖД», а именно:

- - техническое обслуживание (ТО-2) - через 72 часа;
- - техническое обслуживание (ТО-3) - через 15 тыс. км пробега;
- - текущий ремонт (ТР-1) - через 50 тыс. км пробега тепловоза;
- - текущий ремонт (ТР-2) - через 200 тыс. км пробега тепловоза;
- - текущий ремонт (ТР-3) - через 400 тыс. км пробега тепловоза;
- - средний ремонт (СР) - через 800 тыс. км пробега тепловоза;
- - капитальный ремонт (КР-1) - через 1 600 тыс. км пробега тепловоза.

Перечень работ и нормы времени на слесарные работы по обслуживанию и ремонту составных частей системы ЭСУТПН в соответствии требованиями соответствующих Руководств по эксплуатации при проведении плановых видах ТО и ТР тепловозов 2ТЭ116 в условиях сервисного локомотивного депо, приведены в Приложении А.

Перечень работ и нормы времени на слесарные работы по обслуживанию и ремонту штатного оборудования дизеля при проведении плановых видах ТО и ТР тепловозов 2ТЭ116 приведены в Приложении Б.

Количество ремонтов и обслуживаний за принятый горизонт расчета определяется исходя из межремонтных периодов, установленных для соответствующей серии тепловозов распоряжением ОАО «РЖД» от 17.01.2005 г. № 3р «О системе технического обслуживания и ремонта локомотивов ОАО «РЖД».

Количество капитальных ремонтов:



$$n_{\text{кр}} = \frac{T_{\text{ГР}}}{T_{\text{кр}}}, \quad (37)$$

где  $T_{\text{кр}}$  – установленный межремонтный период до КР.

Количество средних ремонтов:

$$n_{\text{ср}} = \frac{T_{\text{ГР}}}{T_{\text{ср}}} - n_{\text{кр}}, \quad (38)$$

где  $T_{\text{ср}}$  – установленный норматив до среднего ремонта.

Количество текущих ремонтов в объеме ТР-3:

$$n_{\text{ТР-3}} = \frac{T_{\text{ГР}}}{T_{\text{ТР-3}}} - (n_{\text{кр}} + n_{\text{ср}}), \quad (39)$$

где  $T_{\text{ТР-3}}$  – установленный норматив до ремонта в объеме ТР-3.

$$n_{\text{ТР-2}} = \frac{T_{\text{ГР}}}{T_{\text{ТР-2}}} - (n_{\text{кр}} + n_{\text{ср}} + n_{\text{ТР-3}}), \quad (40)$$

где  $T_{\text{ТР-2}}$  – установленный норматив до ремонта в объеме ТР-2.

$$n_{\text{ТР-1}} = \frac{T_{\text{ГР}}}{T_{\text{ТР-1}}} - (n_{\text{кр}} + n_{\text{ср}} + n_{\text{ТР-3}} + n_{\text{ТР-2}}), \quad (41)$$

где  $T_{\text{ТР-1}}$  – установленный норматив до ремонта в объеме ТР-1.

Количество технических обслуживаний в объеме ТО-3:

$$n_{\text{ТО-3}} = \frac{T_{\text{ГР}}}{T_{\text{ТО-3}}} - (n_{\text{кр}} + n_{\text{ср}} + n_{\text{ТР-3}} + n_{\text{ТР-2}} + n_{\text{ТР-1}}), \quad (42)$$

где  $T_{\text{ТО-3}}$  – установленный норматив до технического обслуживания в объеме ТО-3.

Количество технических обслуживаний в объеме ТО-2:

$$n_{\text{ТО-2}} = \frac{T_{\text{ГР}}}{T_{\text{ТО-2}}} - (n_{\text{КР}} + n_{\text{СР}} + n_{\text{ТР-3}} + n_{\text{ТР-2}} + n_{\text{ТР-1}} + n_{\text{ТО-3}}), \quad (43)$$

где  $T_{\text{ТО-2}}$  – установленный норматив до технического обслуживания в объеме ТО-2.

Экономия годовых расходов за счет снижения расхода запасных частей в данном расчете не учитывалась.

#### 4.5 Результаты расчета экономической эффективности

Исходные данные для расчета составляющих эксплуатационных расходов от применения электронных систем и результаты расчета приведены в Приложении В. Динамика изменения интегрального эффекта и срок окупаемости от применения электронных систем приведены на рисунках 20 и 21 для вариантов 2 и 3 соответственно. Обобщенные результаты расчета коммерческой эффективности и срока окупаемости применения электронных систем в сравнении с штатной комплектацией дизеля приведены в таблице 18.

Таблица 18 - Обобщенные результаты расчета

№ п/п	Вариант комплектации	Показатель	Значения показателей
1	Вариант 2	Чистый доход, тыс. руб	7202,54
		ЧДД, тыс. руб.	2264,95
		Срок окупаемости, год	3,60
2	Вариант 3	Чистый доход, тыс. руб	7437,32
		ЧДД, тыс. руб.	2440,74
		Срок окупаемости, год	3,20

Интегральный  
экономический эффект,  
тыс. руб.

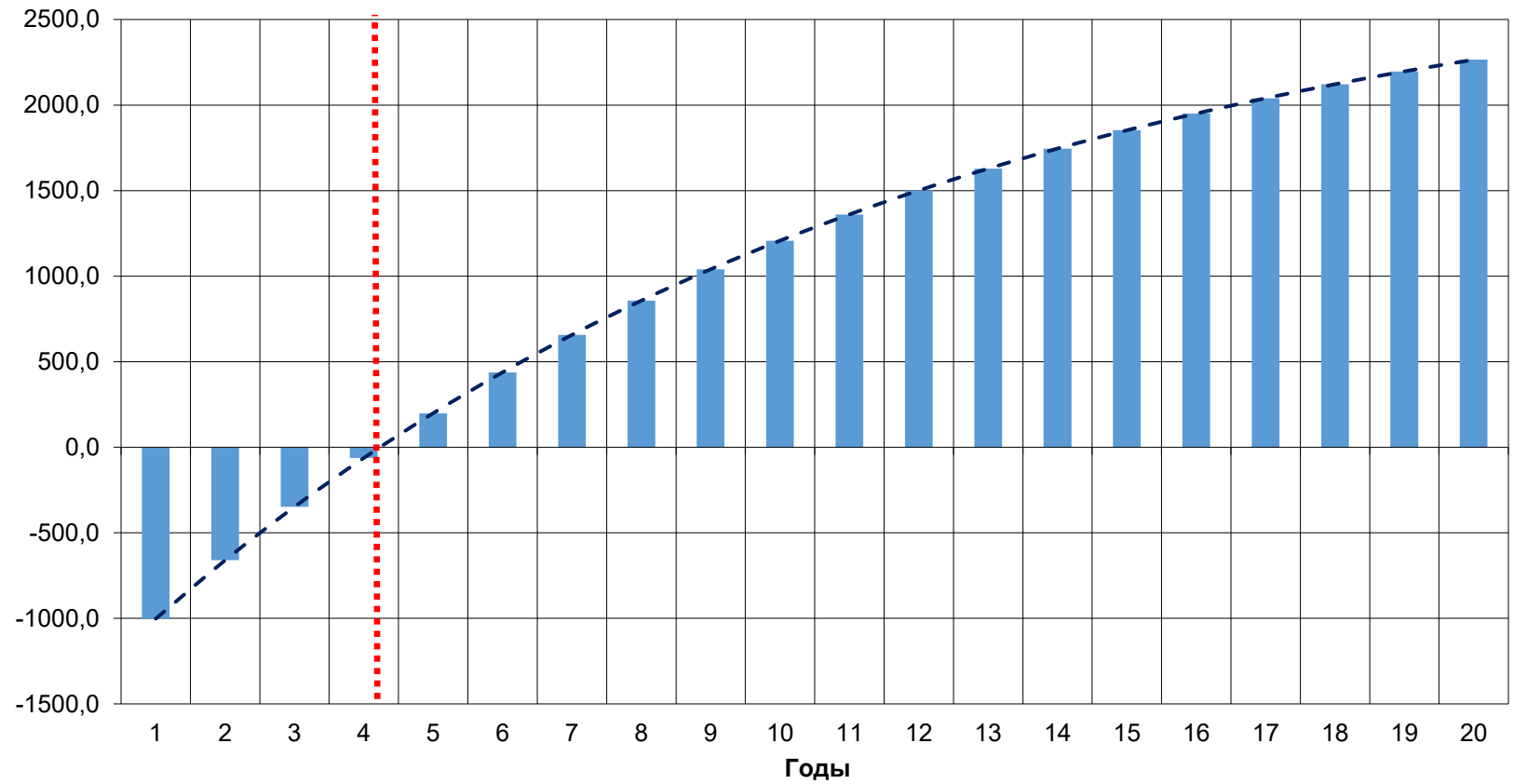


Рисунок 21 - Динамика изменения интегрального эффекта (Вариант 2)

**Интегральный  
экономический эффект,  
тыс. руб.**

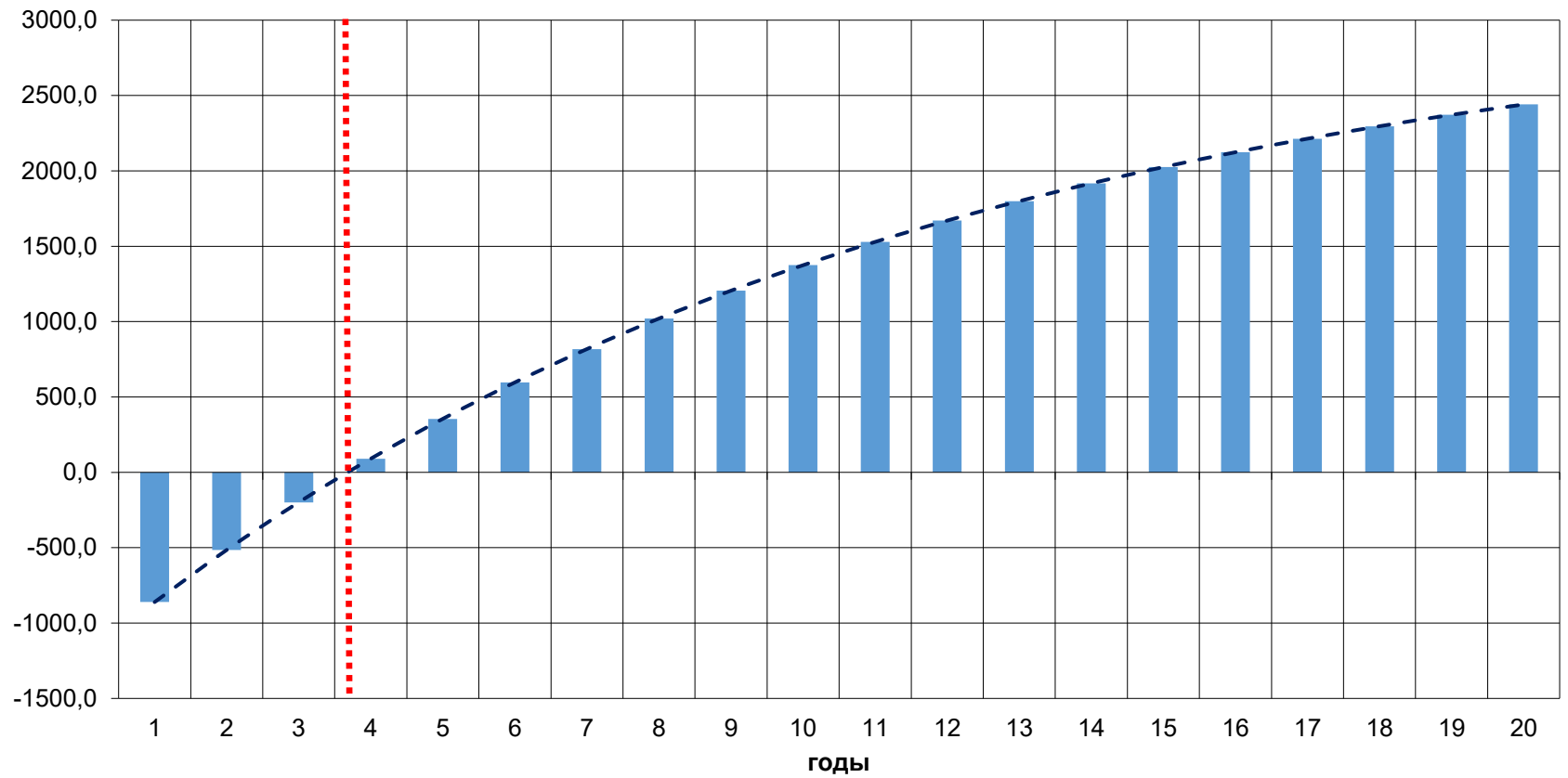


Рисунок 22 - Динамика изменения интегрального эффекта (Вариант 3)

#### 4.6 Выводы по разделу 4

1. Расчет экономической эффективности применения электронных систем управления ДГУ 18-9ДГ тепловозов серии 2ТЭ116 выполнен в соответствии с действующими в ОАО «РЖД» методическими рекомендациями и по нормативам, установленным в ОАО «РЖД».

2. Расчет выполнен на основе соизмерения фактических затрат и полученных результатов. В качестве затрат рассмотрены стоимостные показатели электронных систем управления нагрузкой и наддувом дизеля, в качестве результатов – экономия эксплуатационных расходов от их применения.

3. Применение электронных систем» позволит обеспечить экономию годового среднеэксплуатационного расхода топлива одной секцией тепловоза 2ТЭ116 с дизель-генераторной установкой типа 18-9ДГ:

- 3,18 % для варианта 2;
- 3,28 % для варианта 3.

4. Средняя величина экономии годовых эксплуатационных расходов на дизельное топливо одной секцией тепловоза 2ТЭ116 с дизель-генераторной установкой типа 18-9ДГ составляет:

- 499,6 тыс. руб. для варианта 2;
- 514,4 тыс. руб. для варианта 3.

5. Величина чистого дохода за срок службы электронных систем в сравнении со штатной комплектацией дизель-генератора составит:

- 7202,54 тыс. руб. для варианта 2;
- 7437,32 тыс. руб. для варианта 3.

6. Величина чистого дисконтированного дохода от установки электронных систем ДГУ, приведенная к начальному году, в сравнении со штатной комплектацией дизель-генератора составит соответственно:

- 2264,95 тыс. руб. для варианта 2;

- 2440,74 тыс. руб. для варианта 3.

7. Срок окупаемости затрат от установки электронных систем ДГУ составит:

- 3,60 года для варианта 2;

- 3,20 года для варианта 3.

8. Расчет технико-экономической эффективности применения электронных систем управления дизель-генератором должен корректироваться и уточняться по мере изменения цен и нормативов расчета.

## Заключение

По результатам проведенных исследований сделаны следующие основные выводы:

1. Разработана математическая модель рабочих процессов совместной работы поршневой части дизеля с агрегатами наддува при применении перепуска рабочего тела, которая позволила исследовать изменение показателей работы дизеля при различных внешних атмосферных условиях.
2. Подтверждена эффективность электронной системы управления дизель-генератором, обеспечивающей расширение режимов работы дизеля и реализующей алгоритмические защиты турбокомпрессора и дизельного двигателя. Срабатываний клапанов системы регулирования наддува путем перепуска воздуха от компрессора на вход в турбину, установленных на контрольной группе тепловозов в качестве дополнительной меры по требованию Дирекции тяги, в эксплуатации с 2017 г. не зафиксировано.
3. Разработан метод определения показателей работы тепловоза при выполнении поездной операции с учетом параметров и режимов работы дизель-генераторной установки, ее вспомогательного оборудования.
4. Применение электронной системы управления дизельным двигателем обеспечит положительный экономический эффект, величина которого будет зависеть от режимов загрузки силовой установки, стоимости технического обслуживания и ремонта системы регулирования наддува на протяжении жизненного цикла, стоимости проведения неплановых ремонтов дизеля и его вспомогательного оборудования.
5. Проведенный комплекс расчетно-экспериментальных исследований позволяет сделать вывод о избыточности применения систем регулирования наддува путем перепуска рабочего тела на тепловозах с высокофорсированными двигателями, оборудованных электронной системой управления частотой вращения коленчатого вала, мощностью тяговой передачи и системой наддува.

## Список литературы

1. Ольховский, Ю.В. Дизели зарубежных и отечественных тепловозов. - Двигатели внутреннего сгорания [Текст]/ Ю.В. Ольховский [и др.]. - М.: НИИинформтяжмаш,1978. -31 с.
2. Официальный сайт ОАО «Коломенский завод» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kolomnadiesel.com/> (дата обращения: 17.06.2017).
3. Официальный сайт ОАО «Волжский дизель имени Маминых» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vdm-plant.ru/> (дата обращения: 17.06.2017).
4. Официальный сайт ПАО «Звезда» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.zvezda.spb.ru/> (дата обращения: 17.06.2017).
5. Официальный сайт ОАО «УДМЗ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sinaratm.ru/about/enterprises/udmz/> (дата обращения: 17.06.2017).
6. Официальный сайт ОАО «РУМО» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rumo.nnov.ru/> (дата обращения: 17.06.2017).
7. Официальный сайт ОАО «Пензадизельмаш» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pdmz.ru/> (дата обращения: 17.06.2017).
8. Официальный сайт ГП «Завод имени Малышева» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.malyshevplant.com/> (дата обращения: 17.06.2017).
9. Официальный сайт Cummins [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cummins.ru/> (дата обращения: 17.06.2017).
10. Официальный сайт General Motors [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gm.com/> (дата обращения: 17.06.2017).
11. Официальный сайт General Electric [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ge.com/ru/> (дата обращения: 17.06.2017).
12. Официальный сайт Caterpillar [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.caterpillar.com/ru/company.html> (дата обращения: 17.06.2017).
13. Официальный сайт MTU [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mtu-online.com/mtu/company/> (дата обращения: 17.06.2017).



14. Официальный сайт MAN [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.MAN.eu> (дата обращения: 17.06.2017).
15. Соболев, В.Н. Улучшение переходных процессов тепловозных дизелей 10Д100 и Д70 [Текст]/ В.Н. Соболев, Е.Г. Заславский, В.В. Погребняк// Электрическая и тепловозная тяга. -1970.-№11.-с.44-45.
16. Никитин, Е.А. Перспективы повышения мощности тепловозного дизеля 16ЧН26/26 [Текст]/ Е.А. Никитин, Д.А. Дехович, Э.А. Улановский// Труды ВНИТИ. -1985.-вып. 62.-с.21-28.
17. Отчёт о научно-исследовательской работе «Разработка предложений по повышению топливной экономичности дизеля типа Д49 за счёт использования в системе воздухооборота высокооборотных электрических машин». Этап «Дизели типа Д49 и 1-ПД4А повышенной топливной экономичности за счёт оптимизации воздухооборота во всём диапазоне эксплуатационных расходов с использованием в системе наддува высокооборотных электрических машин». ВНИИЖТ, Москва, 1993. 47 с.
18. Технический отчёт по исследованию влияния подкрутки ротора турбокомпрессора ТК34Н-21 на параметры дизель-генератора ПДГ4. №Л2226. ОАО «СКБТ». Пенза, 1998. 23 с.
19. Кизельштейн, М.Е. Совершенствование характеристик высокофорсированного двигателя типа Д49 перспективного тепловоза: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07/Кизельштейн Михаил Ефимович. –Москва, 1994. – 24 с.
20. Кручек В.В. Повышение эффективности работы энергетических установок тепловозов [Текст]/ В.В. Кручек// Известия ПГУПС. -2009.-№4.-с.183-192.
21. Шорох, В.А. Исследование тепловых процессов тепловозного дизеля с турбонаддувом на аналоговых вычислительных машинах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.14/Шорох Валерий Андреевич. –Харьков, 1974. –23 с.
22. Шепелев, В.А. Методы улучшения характеристик систем турбонаддува высокофорсированных дизелей магистральных тепловозов: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07/Шепелев Вячеслав Александрович. –Москва, 2001. –277 с.

23. Гинда, О.П. Повышение эффективности топливоиспользования главных среднеоборотных двигателей балкеров при эксплуатации на частичных нагрузках: дис. ... канд. техн. наук: 05.08.05/Гинда Олег Павлович. – Новосибирск, 2009. –163 с.
24. Shulhan G.M., Saravanamuttoo H.I.H. Variable geometry compressors for improvement of gas turbine part load performance. SAE Prepr., 1976, №760283, 9 pp.
25. Байков, Б.П. Турбокомпрессоры для наддува дизелей [Текст]: Справочное пособие/ Б.П. Байков, В.Г. Бордуков, В.П. Иванов. - Л.: Машиностроение,1975. -200 с.
26. Дехович, Д.А. Агрегаты воздухообеспечения комбинированных двигателей [Текст]/ Д.А. Дехович, Г.И. Иванов, М.Г. Круглов [и др.]; под редакцией М.Г. Круглова. - М.: Машиностроение,1973. -296 с.
27. Cser Gyula. Ein neuartiges Verfahren zur Verbesserung der Abgasturboaufladung."MTZ", 1971, 32, №10, 368-373.
28. Донской А.Л. Система РПРТ тепловозов. Функциональные возможности, комплектующие блоки и оборудование [Текст]/ А.Л. Донской [и др.]// Локомотив. -2006.-№6.-с.22-23.
29. Методика определения экономической эффективности маневровых и промышленных тепловозов РТМ 24.040.016. Издание официальное. -М.: Министерство тяжелого и транспортного машиностроения, 1981. -194 с.
30. Дехович, Д.А. Улучшение внешней характеристики двигателя 16ЧН26/26 путем регулируемого перепуска воздуха из компрессора в турбину [Текст]/ Д.А. Дехович // Энергомашиностроение. –1971. –№ 6.- с.37-39.
31. Перов, К.Ю. Улучшение экономичности транспортных КДВС введением в систему турбонаддува перепуска воздуха или газа: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02/Перов Константин Юрьевич. –Москва, 1988. –194 с.
32. Шапошников, В.Г. Исследование влияния регулирования параметров наддувочного воздуха на показатели работы дизеля в условиях эксплуатации

тепловоза: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07/Шапошников Владимир Григорьевич. –Москва, 1973. –24 с.

33. Гаврилов, А.А. Турбонаддув четырехтактных дизелей с числом цилиндров до трех: дис. ... докт. техн. наук: 05.04.02/Гаврилов Александр Алексеевич. – Владимир, 1999. –277 с.

34. Таманджа Ибрагим Повышение совместной работы судового дизеля и утилизационного котла на долевых режимах: дис. ... канд. техн. наук: 05.08.05/Таманджа Ибрагим. –Астрахань, 2000. –154 с.

35. Пат. 561797 СССР, F02B 37/02, F02D 23/00. Способ регулирования наддува четырехтактного двигателя внутреннего сгорания [Текст]/ В.С. Наливайко; заявитель и патентообладатель Николаевский ордена Трудового Красного Знамени кораблестроительный институт им. адм. С.О. Макарова. - № 2014766/06; заявл. 10.04.74; опубл. 15.06.77, Бюл. №22. – 3 с.

36. Пат. 885576 СССР, F01P 1/00, F02B 37/00. Способ работы двигателя внутреннего сгорания и устройство для его осуществления [Текст]/ Е.А. Лазарев, М.В. Марков; заявитель и патентообладатель Челябинский филиал Государственного союзного научно-исследовательского тракторного института. - № 2896425/25-06; заявл. 20.03.80; опубл. 30.11.81, Бюл. №44. – 4 с.

37. Пат. 1661465 СССР, F02B 37/12, F02D 23/00. Система турбонаддува двигателя внутреннего сгорания [Текст]/ Е.А. Никитин, Д.А. Дехович, К.Ю. Перов, В.П. Поперенко; заявитель и патентообладатель Производственное объединение «Коломенский завод». - № 4682372/06; заявл. 24.04.89; опубл. 07.07.91, Бюл. №25. – 3 с.

38. Пат. 1483070 СССР, F02B 37/12, F02D 23/00. Устройство для наддува двигателя внутреннего сгорания, преимущественно тепловозного [Текст]/ Е.А. Рыбальченко; заявитель и патентообладатель Производственное объединение «Ворошиловградский тепловозостроительный завод» им. Октябрьской революции. - № 4313890/25-06; заявл. 08.10.87; опубл. 30.05.89, Бюл. №20. – 3 с.

39. Патент США №3173242, кл. 60-13, опубл. 1965.
40. Патент США №3925989, кл. 60-602, опубл. 1975.
41. Система электронного управления подачей топлива ЭСУВТ.03. Руководство по эксплуатации. ЭСУВТ.03.00.000 РЭ.
42. ТУ24.04.532-87 Тепловоз 2ТЭ116
43. Дизель-генератор 18-9ДГ Руководство по эксплуатации 18-9ДГ.91РЭ
44. ТУ 3129-058-04601860-2013 Турбокомпрессоры высокого давления типоразмерного ряда ТК35В.
45. Коссов, Е.Е. Оптимизация режимов работы тепловозных дизель-генераторов [Текст]/ Е.Е. Коссов, С.И. Сухопаров. -М.: Интекст,1999. -184 с.
46. Володин, А.И. Локомотивные энергетические установки [Текст]: Учебник для вузов ж.-д. транспорта/ А.И. Володин, В.З. Зюбанов, В.Д.Кузьмич и др.; под редакцией А.И. Володина.- М.: ИПК «Желдориздат»,2002. -718 с.
47. Хомич, А.З. Экономия топлива и техническая модернизация тепловозов [Текст] / А.З. Хомич, О.И. Тупицын, А.Э. Симпсон.- М.: «Транспорт»,1975. - 264 с.
48. Луканин, В.Н. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1 Теория рабочих процессов [Текст]: Учебник/ В.Н. Луканин, К.А. Морозов, А.С.Хачиян и др.; под редакцией В.Н. Луканина.- М.: Высш. шк.,1995. -368 с.
49. Портнов, Д.А. Быстроходные турбопоршневые двигатели с воспламенением от сжатия [Текст]/ Д.А. Портнов. -М.: Гос. научно-техн. изд-во машиностроительной литературы,1963. -639 с.
50. Вырубов, Д.Н. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей [Текст]: Учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания»/ Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; под редакцией А.С. Орлина, М.Г. Круглова.- М.: Машиностроение,1983. -372 с
51. Коссов, Е.Е. Повышение производительности и топливной экономичности тепловозов путем оптимизации режимов работы дизелей: дис. ... докт. техн. наук: 05.22.07/Коссов Евгений Евгеньевич. –Москва, 1987. –363 с.

52. Коссов, Е.Е. Экспериментальное исследование переходных процессов тепловозных дизелей и систем автоматического регулирования [Текст]/ Е.Е. Коссов, И.Л. Поварков // Труды ВНИИЖТ. –1977. –вып. 570.- с.71-93
53. Коссов, Е.Е. Исследование соответствия некоторых характеристик дизелей с высоким наддувом требованиям тепловозной тяги [Текст]/ Е.Е. Коссов, И.Л. Поварков // Труды ВНИИЖТ. –1975. –№3.- с.23-28
54. Севрук, И.В. Об одном из способов улучшения показателей переходных процессов дизеля Д70 [Текст]/ И.В. Севрук, А.С. Эпштейн // Двигатели внутреннего сгорания. –1981. –№ 10.- с.80-84
55. Крутов В.И. Регулирование турбонаддува ДВС [Текст]/ В.И. Крутов, А.Г. Рыбальченко — М.: «Высшая школа», 1978. — 213 с.
56. Петриченко, Р.М. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС: Алгоритмы прикладных программ: Учеб. Пособие для студентов вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст]/ Петриченко Р.М. [и др.]; под редакцией Р.М. Петриченко. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. -328 с.
57. Иванченко, Б.И. Машинно-ориентированные методы расчета комбинированных двигателей [Текст]/ Иванченко Б.И. [и др.] - М.: Машиностроение, 1978. -168 с.
58. Глаголев, Н.М. Рабочие процессы двигателей внутреннего сгорания [Текст]/ Глаголев Н.М. - М.: Машгиз, 1950. -480 с.
59. Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей [Текст]/ Орлин А.С. [и др.] под рук. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. - М.: Машиностроение, 1983. -375 с.
60. Мизернюк, Г.Н. Методика расчета рабочего процесса ДВС на ЭВМ [Текст]/ Г.Н. Мизернюк, А.С. Кулешов // Изв. ВУЗов: Машиностроение. –1986. –№ 6.- с.97-101
61. Кулешов, А.С. Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.04.02/Кулешов Андрей Сергеевич. –Москва, 2011. –32 с.

62. Мизернюк, Г.Н. Расчет характеристик комбинированного ДВС [Текст]/ Г.Н. Мизернюк [и др.] // Изв. ВУЗов: Машиностроение. –1972. –№ 12.- с.83-87
63. Мизернюк, Г.Н. Исследование влияния агрегатов наддува на характеристики комбинированного ДВС [Текст]/ Г.Н. Мизернюк, В.С. Козлов // Изв. ВУЗов: Машиностроение. –1974. –№ 1.- с.91-95
64. Михаилиди, К.Г. Повышение эффективности работы тепловозов в режимах трогания и разгона составов: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07/Михаилиди Константин Георгиевич. –Москва, 1995. –233 с.
65. Сухопаров, С.И. Повышение эффективности работы тепловозных дизелей корректированием нагрузки в переходных процессах: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07/Сухопаров Сергей Иванович. –Москва, 1988. –236 с.
66. ТУ 2501-001-05763843-2002 Тепловозный дизель-генератор типа 18-9ДГ
67. Беляев А.И. Тепловозные дизели: перспективы совершенствования [Текст]/ А.И. Беляев, Е.В. Князева// Локомотив. -2004.-№7.-с.34-37.
68. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика. Том 1 [Текст]: Учебное руководство. Для втузов/ Г.Н. Абрамович. - М.: Наука, Гл. ред. физ-мат.лит., 1991. -600 с.
69. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика. Том 2 [Текст]: Учебное руководство. Для втузов/ Г.Н. Абрамович. - М.: Наука, Гл. ред. физ-мат.лит., 1991. -304 с.
70. Котляр, И.В. Переходные процессы в газотурбинных установках [Текст]/ И.В. Котляр. - Л.: Машиностроение, 1979. -254 с.
71. Turbocharged flat-six has fast throttle response. Automot. Eng., 1975, 83, №1, 24.
72. Становова, Ю.Ю. Повышение эффективности работы системы воздухооборудования тепловозных дизелей на неуставившихся режимах: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07/Становова Юлия Юрьевна. –Самара, 2012. –166 с.
73. Орлин, А.С. Расчет рабочих процессов в двигателях внутреннего сгорания [Текст]/ Орлин А.С. [и др.] под ред. А.С. Орлина - М.: Машгиз, 1958. -158 с.

74. Разработка методики выбора тепловозной характеристики четырехтактного дизеля 4000-8000 л.с. с учетом режимов эксплуатации и степени форсировки по наддуву: Отчет/Моск. институт инж. ж.-д. транспорта. МИИТ;/ Руководитель Е.Е. Коссов – 6-У/79; № Г.р. 79042722.- М., 1981-129 с.
75. ГОСТ Р 53639-2009 Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Приемка. Методы испытаний.
76. Zinner K. Zum problem der Leistungsteigerung von Dieselmotoren. Hansa, 1969, 106, №19, 1714-1722.
77. Нечаев, Ю.Н. Теория авиационных газотурбинных двигателей. Часть 1 [Текст]/ Ю.Н. Нечаев, Р.М. Федоров. -М.: Машиностроение,1977. -312 с.
78. Циннер, Карл Наддув двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Пер. с нем. В.И. Федышина; Под ред. Н.Н. Иванченко. - Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. - 263 с.
79. Бабел, М. Теоретические основы и методология выбора объемов и технологий модернизации тепловозов по критерию стоимости жизненного цикла: дис. ... док. техн. наук: 05.22.07/Бабел Марек. –Москва, 2014. –266 с.
80. Стечкин, Б.С. Теория реактивных двигателей. Лопаточные машины [Текст]/ Б.С. Стечкин [и др.] / М.: Оборонгиз, 1956. - 548 с.
81. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст]/ М.: Транспорт, 1985. - 287 с.
82. Коссов, Е.Е. Микропроцессорная система регулирования дизель-генератора [Текст]/ Е.Е. Коссов [и др.]//Локомотив. – 2002. –с.48-50.
83. Баранов, Л.А. Оптимизация управления движением поездов [Текст]: Учебное пособие/ Л.А. Баранов, Е.В. Ерофеев, И.С. Мелешин, Л.М. Чинь; под редакцией Л.А. Баранова. -М.: МИИТ, 2011. - 164 с.
84. Фурман, В.В. Повышение эксплуатационно-технических характеристик дизель-генераторов тепловозов путем создания и совершенствования систем электронного управления: дис. ... докт. техн. наук: 05.04.02/Фурман Виктор Владимирович. –Москва, 2016. –321 с.

85. Валиев, М.Ш. Повышение эффективности работы тепловозов средствами бортовых средств диагностирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07/Валиев Мухаммад Шералиевич. –Санкт-Петербург, 2011. –161 с.
86. Лакин, И.К. Применение статистических методов при диагностировании тепловозов [Текст]/ И.К. Лакин, А.А. Аболмасов, В.А. Мельников//Известия Транссиба. – 2015. –№ 1(21).- с.20-29.
87. ГОСТ 16350-88 Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей: введ. 01.07.1981. М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1981. 221 с.
88. ТУ 3129-063-24428398-2014 Технические условия на систему управления подачей топлива ЭСУВТ.03.
89. Коссов, Е.Е. К вопросу совершенствования методов имитации поездной работы маневрового локомотива [Текст]/ Е.Е. Коссов, И.А. Кузнецова// Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. -2013.-№1.-с.22-26.
90. Коссов, Е.Е. К вопросу расчета затрат энергии на привод агрегатов автономного локомотива [Текст]/ Е.Е. Коссов, И.А. Кузнецова, А.Ю. Елишин// Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. -2011.-№2.-с.35-38.
91. Киркинский, А.С. Линейная алгебра и аналитическая геометрия [Текст]: Учебное пособие/ А.С. Киркинский. -М.: Академический проспект, 2006. – 256 с.
92. Белова, Л.Ю. Элементы теории множеств и математической логики. Теория и задачи [Текст]: Учебное пособие/ Л.Ю. Белова, Ю.А. Белов; Яросл. гос. ун-т. им. П.Г. Демидова. -Ярославль: ЯрГУ, 2012. - 204 с.
93. Силюта, А.Г. Изменение скоростных характеристик тепловозного дизеля перепуском воздуха и газов [Текст]/ А.Г. Силюта [и др.]//Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции, посвященной 140-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора Ю.В. Ломоносова. – 2016. –с.21-25.



94. «Методические рекомендации по обоснованию эффективности инноваций на железнодорожном транспорте», утвержденные Департаментом технической политики МПС РФ от 26.04.1999 г. № ЦТехО-11.
95. Коссов, В.В. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов [Текст]/ В.В. Коссов [и др.] М.: Экономика, 2000. - 421 с.
96. Айзинбуд, С.Я. Эксплуатация локомотивов [Текст]/ С.Я. Айзинбуд, П.И. Кельперис. - М.: Транспорт, 1990. – 261 с.
97. Bhattacharyya, A. On a measure of divergence between two statistical populations defined by their probability distributions// Bulletin of the Calcutta Mathematical Society. –1943. –№ 35. –р. 99–109.
98. Силюта, А.Г. Выбор способа регулирования системы воздухообеспечения тепловозных дизелей [Текст] / А.Г. Силюта // Наука и техника транспорта. – 2018. - №1. – с. 34-39.
99. Силюта, А.Г. Моделирование поездной работы магистрального локомотива [Текст] / А.Г. Силюта, Е.Е. Коссов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. - №4. – с. 218 – 221.
100. Силюта А.Г. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа расчета характеристик совместной работы транспортного дизеля с агрегатами наддува T-Diesel», №2019612971 /Силюта А.Г., Коссов Е.Е., Некрасов Г.И. // заявка №2018661141, дата поступления 12.10.2018, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 05.03.2019.
101. Асабин, В.В. Повышение эффективности работы силовых установок тепловозов применением системы электронного управления [Текст] /В.В. Асабин, А.Г. Силюта, Е.Е. Коссов // Вестник транспорта Поволжья. – 2018 - №5. – с. 67 – 71.
102. Силюта, А.Г. Оценка эффективности внедрения системы с электронным управлением подачи топлива (ЭСУВТ) [Текст]/ А.Г. Силюта, Е.Е. Коссов//

Труды XIII научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – 2013 –с. III-47 - III-48.

103. Силюта, А.Г. К вопросу совершенствования математических моделей тепловозных дизель-генераторов [Текст]/ А.Г. Силюта //Труды научно-практической конференции Неделя науки-2014 "Наука МИИТа -транспорту". – В двух частях. – Часть 1 –М.: МГУПС(МИИТ), 2014 –с.III-90.

104. Силюта, А.Г. К вопросу совершенствования математических моделей тепловозных дизель-генераторов [Текст]/ А.Г. Силюта //Сборник трудов Девятой международной научно-практической конференции "Транспортная инфраструктура Сибирского региона". – В двух томах. –Том 2 –Иркутск.: ИрГУПС, 2018 –с.366-368.

105. Силюта, А.Г. Повышение эффективности локомотивного парка тепловозов с дизелями Д49 применением отечественной электронной системы управления [Текст]/ А.Г. Силюта [и др.]//Сборник материалов всероссийской научно-практической конференции "ОБРАЗОВАНИЕ - НАУКА-ПРОИЗВОДСТВО". – В двух томах. – Том 1 –Чита.: ЗаБИЖТ ИрГУПС, 2018 –с.50-53.

106. Патрахальцев, Н.Н. Форсирование двигателей внутреннего сгорания наддувом [Текст]/ Н.Н. Патрахальцев, А.А. Савастенко //М.: Легион-Автодата, 2019. - 176 с.

107. Рыжов В.А., Перов К.Ю. Расширение области работы четырехтактного дизеля средствами системы турбонаддува // Двигателестроение, С. Петербург, 2003. №4, с. 12-15.

108. Рыжов В.А. Перспективы развития высокофорсированного транспортного двигателя. /В.А.Рыжов // Тяжелое машиностроение. М., 2002, №9, с.52-54.

109. Рыжов В.А. Разработка и внедрение технологий, повышающих экономические показатели двигателей для локомотивов // Сборник докладов Международной конференции Железнодорожное машиностроение. Перспективы, технологии, приоритеты. М., 2007, с.56-57.

## **Приложение А**

Перечень работ и нормы времени на слесарные работы по обслуживанию и ремонту составных частей системы ЭСУТПН

Таблица А1 - Нормы времени на слесарные работы по обслуживанию и ремонту

№ п/п	Содержание работ	Разряд работ	Норма времени по видам ТО и ремонта, нормо-час				
			ТО-2	ТО-3	ТР-1	ТР-2	ТР-3
1	Проверить отсутствие утечек топлива в местах соединения трубок высокого давления, коллектора к корпусу насоса электроуправляемого (ЭТНВД), трубок подвода и отвода топлива к секциям коллекторов, подводящей и отводящей труб к крайним секциям коллектора.	4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
2	Проверить целостность и соответствие номиналу вставок плавких блока управления (БУ) и блока питания (БП). Несоответствующие вставки плавкие заменить.	4	-	0,1	0,1	0,1	0,1
3	Удалить ветошью, смоченной уайт-спиритом, грязь с поверхности разъемов составных частей системы	3	-	0,15	0,15	0,15	0,15
4	Проверить надежность соединения всех разъемов системы, при необходимости подтянуть.	3	-	0,15	0,15	0,15	0,15
5	Проверить надежность крепления ЭТНВД к дизелю. При необходимости подтянуть.	4	-	0,4	0,4	0,4	0,4
6	Подключить к БУ компьютер с сервисной программой Inject Service и произвести проверку, а при необходимости корректировку текущего времени в БУ	6	-	-	0,2	0,2	0,2
7	Проверить работоспособность элементов системы: БП; ПЧВ; ПФО; МПНВ; термопреобразователи сопротивления; преобразователи давления, преобразователи напряжения измерительные.	5	-	-	-	0,7	0,7
8	ЭТНВД с дизеля снять.	6	-	-	-	3,5	3,5
9	ЭТНВД проверить в соответствии с 4.3.7 РЭ. При выявлении неисправностей заменить или восстановить изношенные детали.	6				11,2	11,2
10	ЭТНВД на дизель установить	6				4,8	4,8
11	Снять БУ с тепловоза, проверить состояние монтажа, паек жгутов, разъемов, надежность крепления навесных элементов. Проверить БУ согласно 3.3.2 РЭ. Выявленные неисправности устранить. Исправный БУ установить на тепловоз.	6	-	-	-	-	1,8

## Продолжение таблицы А1

№ п/п	Содержание работ	Разряд работ	Норма времени по видам ТО и ремонта, нормо-час				
			ТО-2	ТО-3	ТР-1	ТР-2	ТР-3
12	Проверить состояние и целостность кабелей и жгутов системы, состояние маркировки на них. Поврежденные кабели и жгуты заменить. При необходимости маркировку восстановить. Контакты штепсельных разъемов промыть спиртом этиловым ректифицированным техническим ГОСТ 18300-72. Разъемы соединить, обеспечив надежность их сочленения.	6	-	-	-	-	1,8
13	Заменить элемент питания на плате процессора в БУ..	4	-	-	-	-	0,1
14	Заменить преобразователь фазовой отметки.	5	-	-	-	-	0,1
15	Проверить работу механизма перепуска наддувочного воздуха (МПНВ) при реостатных испытаниях.	5	-	-	-	0,2	0,2
16	Проверить надежность крепления турбокомпрессора к кронштейну дизеля	3	-	0,25	-	-	-
17	Проверить герметичность подсоединения всех систем к турбокомпрессору, отсутствие течи воды и масла в трубопроводах и через стыки корпусов	3	-	1,0	-	-	-
18	Замерить осевой люфт ротора и легкость вращения ротора турбокомпрессора от руки	5	-	-	0,3	-	-
19	Турбокомпрессор с дизеля снять	4	-	-	-	3,6	3,6
20	Турбокомпрессор разобрать, очистить, проверить балансировку ротора, отремонтировать, заменить втулки подшипников и подпятник, собрать и установить на дизель	5	-	-	-	14,7	14,7
Итого		88,55	0,4	2,45	1,7	40,1	43,9
В том числе общие нормы времени по разрядам работ		3	-	1,55	0,3	0,3	0,3
		4	0,4	0,9	0,9	4,5	4,6
		5	-	-	0,3	15,6	15,7
		6	-	-	0,2	19,7	23,3

## **Приложение Б**

Перечень работ и нормы времени на слесарные работы по обслуживанию и ремонту штатного оборудования дизеля

Таблица Б1 - Нормы времени на слесарные работы по обслуживанию и ремонту

№ п/п	Содержание работ	Разряд работ	Норма времени по видам ТО и ремонта, нормо-час				
			ТО-2	ТО-3	ТР-1	ТР-2	ТР-3
1	Проверить отсутствие утечек топлива в местах соединения трубок высокого давления и топливного коллектора, при необходимости устранить	4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
2	Проверить надежность крепления топливных насосов высокого давления (ТНВД) к дизелю	4	-	0,4	0,4	0,4	0,4
3	Проверить работу топливной аппаратуры на работающем дизеле до постановки в ремонт	5	-	0,23	0,23	-	-
4	Осмотреть топливную аппаратуру, сделать ревизию, проверить и отрегулировать	5	-	3,49	3,49		
5	ТНВД с дизеля снять	4	-			3,84	3,84
6	ТНВД разобрать, отремонтировать, собрать	6				18,46	18,56
7	ТНВД обкатать, отрегулировать, испытать	6	-			8,16	8,16
8	ТНВД на дизель установить	5				5,6	5,6
9	Регулятор частоты вращения и мощности (ОРЧМ) осмотреть, при необходимости добавить масло.	3	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
10	Сменить масло в исполнительном устройстве ОРЧМ.	3	-	-	0,40	0,40	0,40
11	ОРЧМ с дизеля снять.	5	-	-	-	0,32	0,32
12	ОРЧМ разобрать, отремонтировать, собрать	6				10,0	10,0
13	ОРЧМ обкатать, испытать, отрегулировать	6				2,97	2,97
14	ОРЧМ на дизель установить	5	-	-	-	0,49	0,49
15	Проверить надежность крепления турбокомпрессора к кронштейну дизеля	3	-	0,25	-	-	-
16	Проверить герметичность подсоединения всех систем к турбокомпрессору, отсутствие течи воды и масла в трубопроводах и через стыки корпусов	3	-	1,0	-	-	-
17	Замерить осевой люфт ротора и легкость вращения ротора турбокомпрессора от руки	5	-	-	0,3	-	-
18	Турбокомпрессор с дизеля снять	4	-	-	-	3,6	3,6

## Продолжение таблицы Б1

№ п/п	Содержание работ	Разряд работ	Норма времени по видам ТО и ремонта, нормо-час				
			ТО-2	ТО-3	ТР-1	ТР-2	ТР-3
19	Турбокомпрессор разобрать, очистить, проверить балансировку ротора, отремонтировать, заменить втулки подшипников и подпятник, собрать и установить на дизель	5	-	-	-	14,7	14,7
Итого			0,55	5,92	5,77	69,49	69,49
В том числе общие нормы времени по разрядам работ		3	0,15	1,4	0,55	0,55	0,55
		4	0,4	0,8	0,8	8,24	8,24
		5	-	3,72	4,02	21,11	21,11
		6	-	-	-	39,59	39,59



## **Приложение В**

Исходные данные и результаты расчета текущих затрат и экономии  
эксплуатационных расходов

Таблица В1 - Исходные данные и результаты расчета текущих затрат и экономии эксплуатационных расходов

№ п/п	Наименование показателя	Обозначения	Ед. изм.	Значения показателей		
				Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
<b>1</b>	<b>Исходные данные</b>					
1.1	Годовой бюджет времени	T	ч	8640	8640	8640
1.2	Расход топлива ДГУ в часовом интервале работы по результатам воспроизведения поездной операции	V <sub>ч</sub>	кг	112,75	109,16	109,05
1.3	Продолжительность работы на холостом ходу в интервале одного часа работы	t <sub>хх</sub>	мин	37,2	37,2	37,2
1.4	Продолжительность работы на холостом ходу в интервале одного часа работы	t <sub>хх</sub>	%	62	62	62
1.5	Снижение эксплуатационного расхода топлива по режимам загрузки	Δg	%	0,00	3,18	3,28
1.6	Коэффициент технического использования локомотива	КТГ		0,476	0,476	0,476
1.7	Снижение расхода топлива на холостом ходу при снижении частоты с 350 до 280 об/мин	Δ <sub>хх</sub>	кг/ч	0	2,6	2,6
1.8	Цена дизельного топлива (без НДС)	Ц <sub>т</sub>	руб /т	34950	34950	34950
1.9	Цена моторного масла М14Г2ЦС (без НДС)	Ц <sub>м</sub>	руб /т	43000	43000	43000
1.10	Расход масла «на угар»	δ <sub>м</sub>	%	0,95	0,95	0,95
1.11	Ставка налога на имущество	Н <sub>и</sub>	%	2	2	2
1.12	Ставка налога на прибыль	Н <sub>пр</sub>	%	20	20	20
1.13	Расходная ставка на экипировку	e <sub>эк</sub>	руб /т	226,8	226,8	226,8

## Продолжение таблицы В1

№ п/п	Наименование показателя	Обозначения	Ед. изм.	Значения показателей		
				Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
<b>1</b>	<b>Исходные данные</b>					
1.14	Удельная плата за выбросы вредных веществ	$e_3$	руб /т	95,76	95,76	95,76
1.15	Стоимость комплекта оборудования	К	руб	2406027	3024414	2874414
1.16	Стоимость монтажа системы	$K_M$	руб	-	894413,4	802193,4
<b>2</b>	<b>Результаты расчета</b>					
2.1	Годовой бюджет работы тепловоза в эксплуатации	$t_T$	ч	4112,64	4112,64	4112,64
2.2	Продолжительность работы на холостом ходу	$t_{XX}$	ч	2549,84	2549,84	2549,84
2.3	Годовая экономия расхода топлива при работе на холостом ходу	$\Delta G_{XX}$	т	0,00	6,63	6,63
2.4	Общий годовой расход топлива секцией тепловоза	$G_T$	т	463,70	448,94	448,48
2.5	Общая годовая экономия расхода топлива секцией тепловоза	$\Delta G_T$	т	0,00	14,29	14,72
2.6	Общая годовая экономия расхода масла тепловозом	$\Delta G_M$	т	0,00	0,14	0,14
2.7	Относительная величина экономии расхода топлива на х.х.	$\delta_{XX}$	%	0,00	46,38	45,05
2.8	Общая годовая экономия затрат на топливо на секцию тепловоза	$\Delta U_T$	руб	0,00	499584,90	514373,66
2.9	Общая годовая экономия затрат на масло на секцию тепловоза	$\Delta U_M$	руб	0,00	5839,21	6012,06
2.10	Экономия затрат на экипировку	$\Delta U_{ЭК}$	руб	0,00	3272,74	3369,62

## Продолжение таблицы В1

№ п/п	Наименование показателя	Обозначения	Ед. изм ·	Значения показателей		
				Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
<b>2</b>	<b>Результаты расчета</b>					
2.11	Экономия расходов оплаты за выбросы вредных веществ	$\Delta U_3$	руб	0,00	1368,82	1409,34
2.12	Итого экономия эксплуатационных расходов на ГСМ	Эгсм	руб	0,00	505424,11	520385,72
2.13	Экономия расходов на обслуживание при плановых видах ТО и ТР	$\Delta U_{тр}$	руб ·	0,00	15007,45	15048,45
2.14	Итого общая экономия эксплуатационных расходов	Эг	руб	0,00	525073,12	540213,13

## **Приложение Г**

Акт о внедрении результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор ООО «СКБТ»



В.А. Киреев  
2018 г.

АКТ

**О внедрении результатов диссертационной работы А.Г. Силюта  
«ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИЛОВОЙ  
УСТАНОВКИ ТЕПЛОВОЗА ПУТЕМ РАСШИРЕНИЯ ОБЛАСТИ  
РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДИЗЕЛЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ЭЛЕКТРОННОЙ  
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ»,  
представляемой на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы «Повышение эффективности работы силовой установки тепловоза путем расширения области режимов работы дизеля при применении электронной системы управления» в части формирования требований к агрегатам наддува тепловозного дизеля 16ЧН26/26, оборудованного электронной системой управления силовой установкой, без применения систем перепуска рабочего тела были использованы при изготовлении установочной партии турбокомпрессоров ТК35В-36 для модернизации опытной партии тепловозов 2ТЭ116 №№ 1733, 1737, 1738, 1744 и 1362 приписки эксплуатационных локомотивных депо Ершов и Сенная Приволжской Дирекции тяги-филиал ОАО «РЖД» в рамках реализации инвестиционного проекта ОАО «РЖД» «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте» в 2016 г. в сервисном локомотивном депо Саратов – филиал «Южный» ООО «ТМХ-Сервис».

В настоящее время модификация турбокомпрессора ТК35В-36 введена в ТУ 3129-058-04601860-2013 «Турбокомпрессоры высокого давления типоразмерного ряда ТК35В» и поставлена на серийное производство.

Заместитель генерального директора-  
главный конструктор

С.М. Гнездилов

## **Приложение Д**

**Фотоматериалы по демонтажу и промывке охладителя наддувочного воздуха**



Рисунок Д1 - Общий вид трубок охладителя наддувочного воздуха до промывки

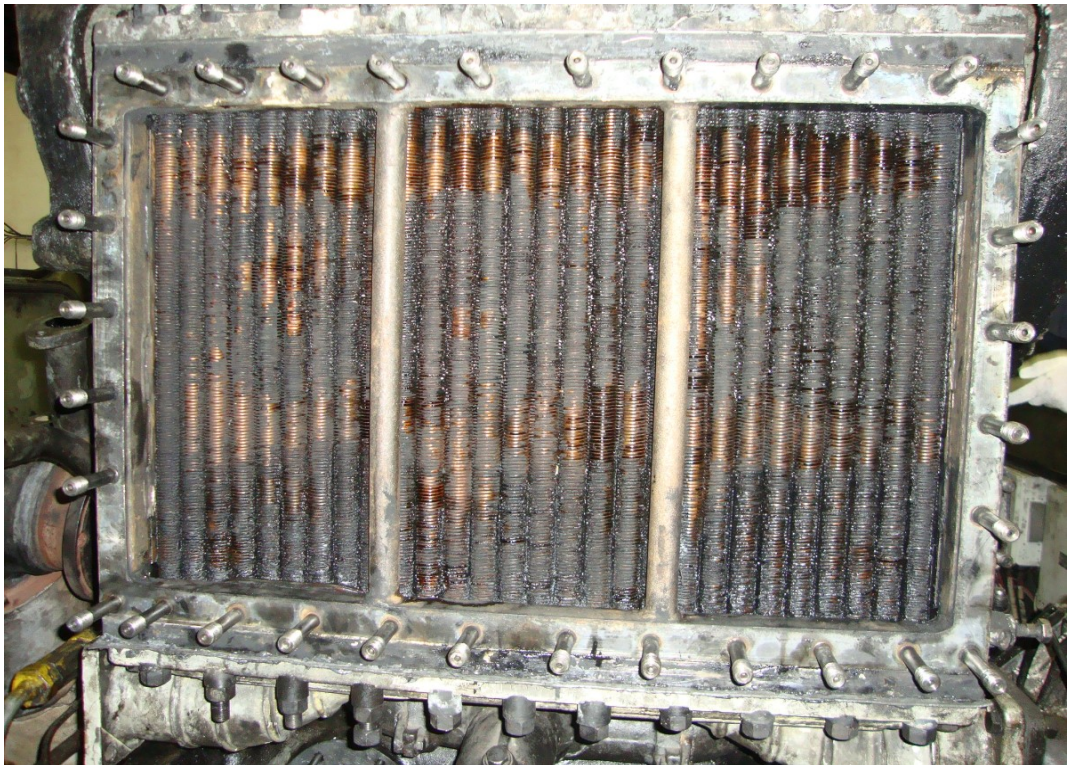


Рисунок Д2 - Общий вид трубок охладителя наддувочного воздуха после промывки





Рисунок ДЗ - Установка охладителя наддувочного воздуха после промывки