

**ФГБОУ ВПО  
«Государственный университет морского и речного флота  
имени адм. С.О. Макарова»**

**ТИМОФЕЕВ В.Н.**

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА АВТОМАТИЧЕСКОГО  
РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ  
СУДОВЫХ ДВС**

Специальность 05.08.05-судовые энергетические установки и их  
элементы (главные и вспомогательные)

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Санкт-Петербург 2015

# ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Целью** настоящей работы является разработка и совершенствование методов и средств автоматического теплового регулирования судовых ДВС.

**Основные научными задачами являются:**

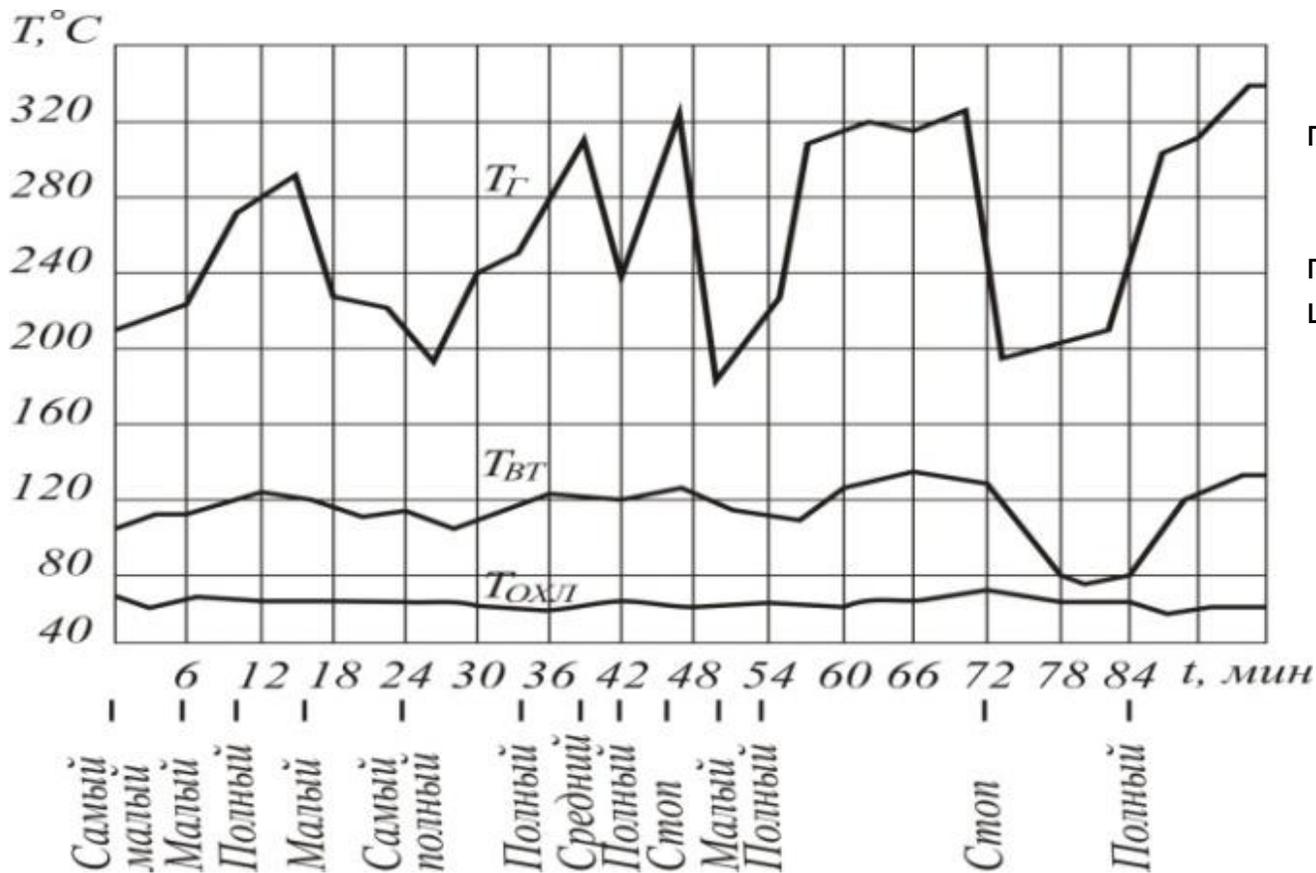
1. Провести анализ влияния температурного состояния на рабочие показатели дизеля и определить совокупность параметров охлаждения наиболее существенно влияющих на технико-экономические и экологические показатели судовых дизелей.
2. Разработать научную концепцию построения системы автоматического регулирования температуры судового дизеля.
3. Совершенствовать (модернизировать) СО, систему смазки (СМ), систему наддува (СН) и аварийной остановки дизеля с целью обеспечения квазиоптимального ТС дизеля и требуемых значений температур деталей ЦПГ при переменных нагрузках работы дизеля.
4. Разработать принципиальную схему АБПТ в режиме получения холода утилизацией ОГ.
5. Разработать, испытать в условиях эксплуатации на дизельных установках электрические терморегуляторы (ТРГ) и выполнить их сравнительный анализ.
6. Провести экспериментальные исследования СО с релейно-импульсным ТРГ (РИТРГ) на судовых дизелях 6NVD 26 А-3, 8ЧН 16,5/18,5.
7. Оценить технико-экономическую эффективность регулирования температурного режима с электрическими ТРГ судовых дизелей в условиях эксплуатации.

## ПОЛОЖЕНИЯ ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

- Уточнение влияния температуры охлаждающей жидкости на тепловое состояние дизеля методом численного моделирования.
- Концепция построения системы автоматического регулирования температуры судовых дизелей.
- Синтез исполнительно-регулирующих устройств быстродействующих терморегуляторов. Основным и практически наиболее важным приложением результатов разработки САРТ ДВС является синтез системы, ее элементов и исполнительно-регулирующего устройства (ИРУ) терморегулятора, позволяющий определить методы регулирования температурного режима САРТ ДВС.
- Разработанные конструкции электрических терморегуляторов: релейно-импульсный, с твердым наполнителем и нагревательными элементами: электронагревателем и термоэлектрическим модулем, позволяют при необходимости работу в режиме «программируемый», обеспечивают создание комбинированной системы регулирования, поддерживают высокий уровень температуры на частичных нагрузках и режимах холостого хода, быстроту включения, достижение требуемых температурных режимов, удобство эксплуатации, улучшение условий эксплуатации, компактность.
- Результаты лабораторных и эксплуатационных испытаний терморегуляторов, подтверждающие получение требуемых результатов.
- Схемы систем: топливной, позволяющей изменять угол впрыскивания топлива при изменении режима работы дизеля и подготавливать топливно-водородную смесь для подачи в цилиндр; дросселирования, регулирующей коэффициент избытка воздуха на переменных нагрузках работы дизеля; охлаждения, позволяющей повышать температуру охлаждающей воды на режимах частичных нагрузок и режимах холостого хода, наддувочного воздуха, обеспечивающей подогрев воздуха на частичных нагрузках, и его охлаждение на номинальных нагрузках; рециркуляции ОГ, обеспечивающей охлаждение ОГ перед подачей в цилиндр, аварийной остановки, исключаяющей перегрев дизеля; охлаждения с возможностью переключения внешнего контура на режим АБХМ.
- Абсорбционный преобразователь теплоты, работающий с использованием ОГ двигателя.
- Многоконтурная система автоматического регулирования температуры судового дизеля регулирует все температурные параметры в системах охлаждения, наддувочного воздуха и смазки, представляющая собой пример рационального решения комплексной автоматизации регулирования теплового состояния судового ДВС.
- Результаты исследования динамических характеристик САРТ судового ДВС.
- Идентификация системы подогрева–охлаждения как объекта регулирования.

## НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ РЕЖИМЫ СДВС

3



Изменение режимов работы дизеля при маневрировании судна:

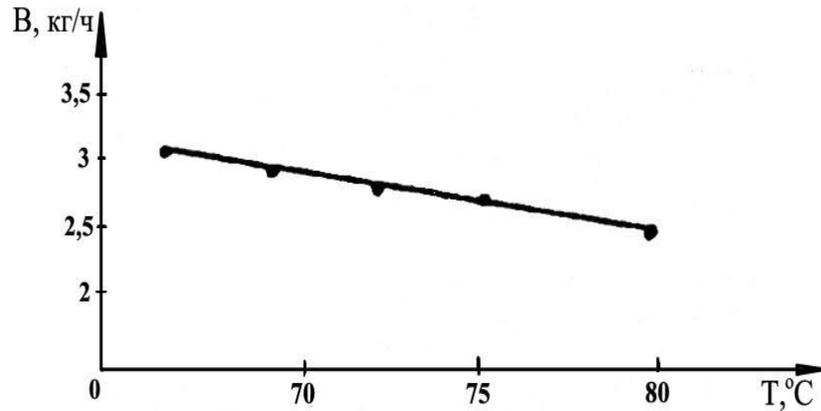
$T_g$ ,  $T_{BT}$ ,  $T_{охл}$  – температуры выпускных газов; втулки цилиндра; охлаждающей цилиндр воды

Неустановившееся температурное состояние сопровождается заметным ростом разности температур в теле деталей и в большинстве случаев – увеличением температурных напряжений.

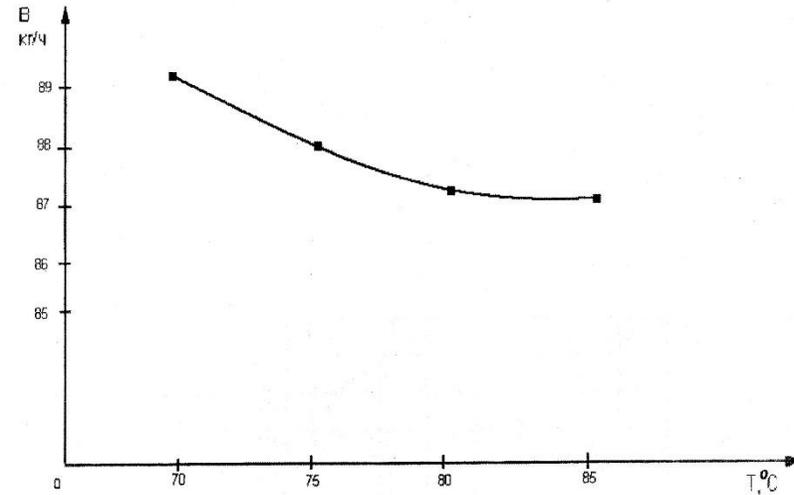
# ВЫБОР ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ СО И ДЕТАЛЕЙ ЦПГ СДВС

п/п	Объекты охлаждения	Нагрузка		
		Частичная	Номинальная	Переменная
		°C		
1.	СО	95-98	80-85	
2.	СНВ	65-80	35-40	
3.	ССМ	80-90 (ВОД), 60-70 (МОД, СОД)		
4.	Зеркало цилиндрической втулки и поршень в зоне канавок колец	160-180		
5.	Стенка цилиндра			ПОСТОЯННАЯ
6.	Распылители при работе на тяжелом топливе	170-180		

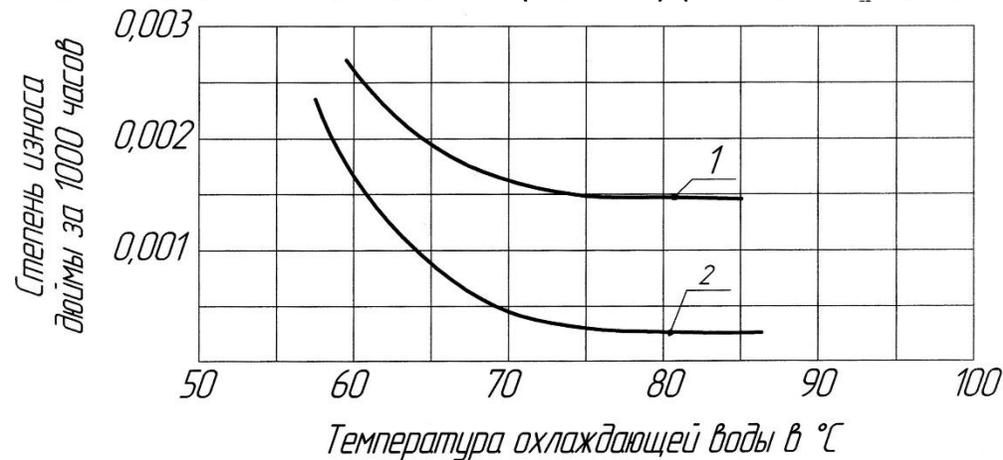
РАСХОД ТОПЛИВА ОТ  $T_{\text{CO}}$  СО  
8ЧН 16,5/ 18,5 НА РЕЖИМАХ  
ХОЛОСТОГО ХОДА,  $n = 618 \text{ мин}^{-1}$



РАСХОД ТОПЛИВА ОТ  $T_{\text{CO}}$  СО  
8ЧН 16,5/ 18,5 НА НОМИНАЛЬНЫХ  
НАГРУЗКАХ,  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ,  $P_e = 395 \text{ кВт}$



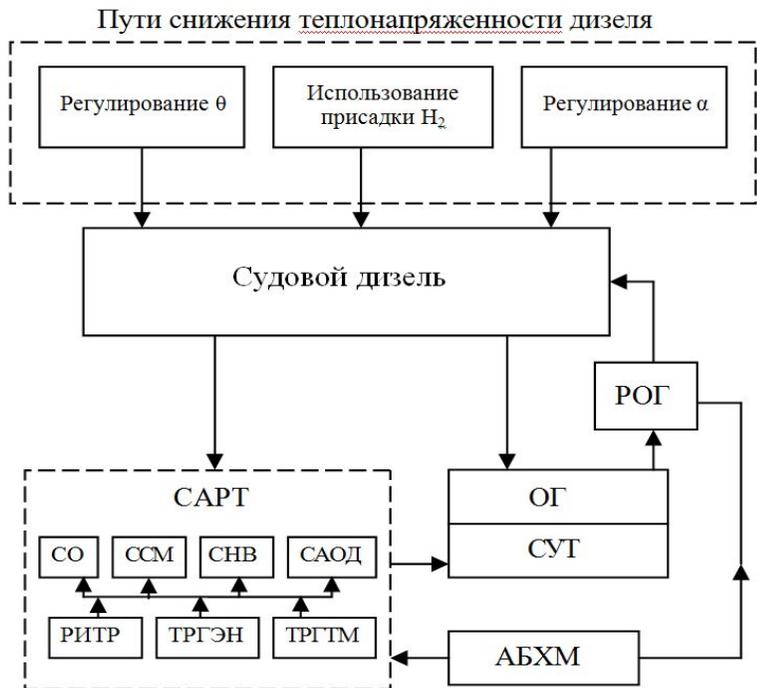
ЗАВИСИМОСТЬ ИЗНОСА ЦИЛИНДРА ОТ  $T_{\text{ОХЛ. ВОДЫ}}$



1 – девять двухтактных дизелей; 2 – девять четырехтактных дизелей

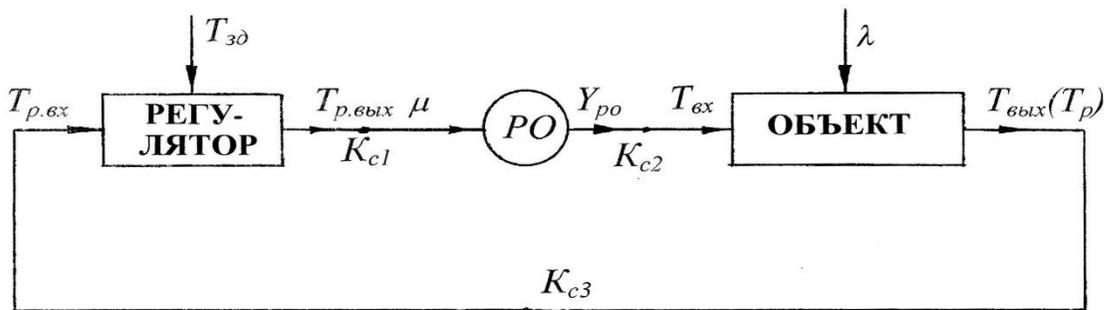
# СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ИССЛЕДОВАНИЙ

6<sub>1</sub>



$\theta$  – угол опережения впрыскивания топлива;  
 $H_2$  – водород в виде присадки;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  
 РОГ – «холодная» рециркуляция ОГ;  
 ОГ – отработавшие газы; СУТ – система утилизации теплоты;  
 АБХМ – абсорбционная холодильная машина; САРТ: СО – система охлаждения; ССМ – система смазочного масла; СНВ – система наддувочного воздуха;  
 САОД – система аварийной остановки дизеля;  
 РИТР – релейно-импульсный терморегулятор;  
 ТРГЭН терморегулятор с электронагревателем; ТРГТМ – терморегулятор с термоэлектрическим модулем.

## СТРУКТУРНАЯ СХЕМА САРТ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ



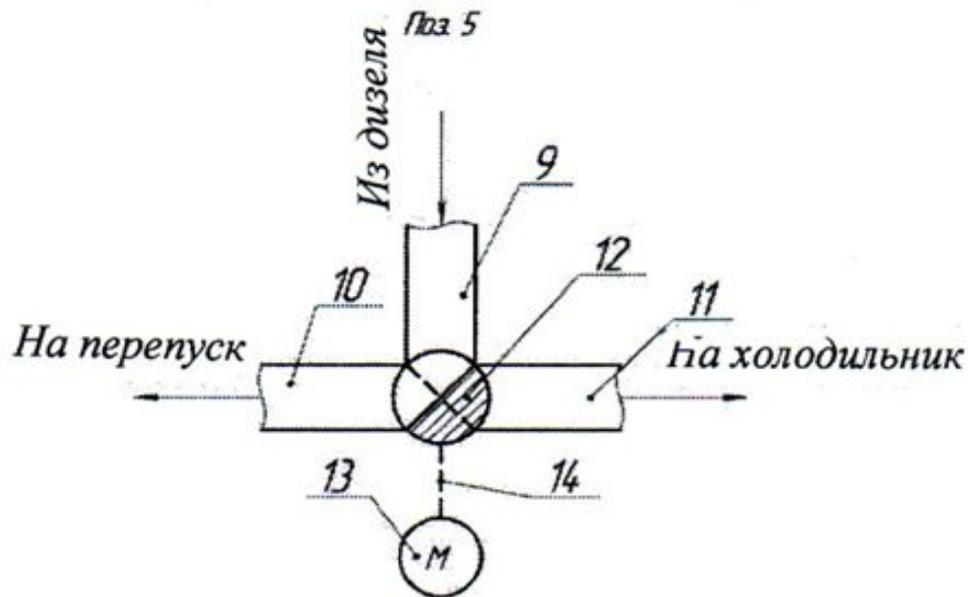
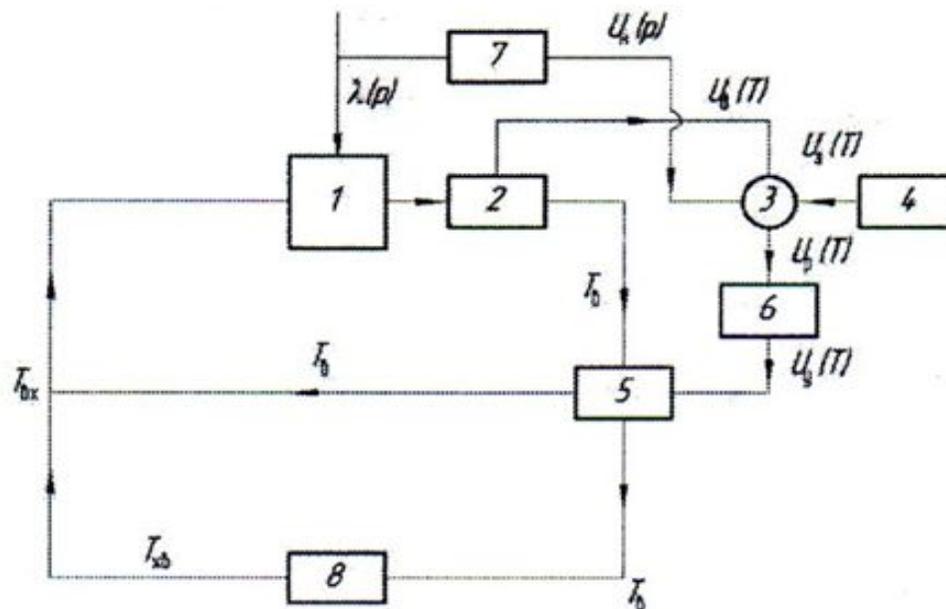
Объект характеризуется:  $T_{вх}, T_{вых}(T_p), \lambda$ .  
 ТРГ характеризуется координатами:  $T_{p,вх}, T_{p,вых}, T_{зд}$ .  
 $K_{c1}, K_{c2}, K_{c3}$  – передаточные коэффициенты связей.  
 $\bar{\lambda} = (\lambda_1, \dots, \lambda_1) \quad \bar{\mu} = (\mu_1, \dots, \mu_r)$   
 $|\mu_1| \leq U_1, \dots, |\mu_r| \leq U_r$ , где  $U_1, \dots, U_r$  – заданные константы.  
 $G(T_p, \bar{T}_{зад}, \bar{\lambda}, t) = \min$  – аналитическая формулировка цели регулирования

Мерой ухудшения может стать разность  $G - G_{\min}$  или какая-нибудь монотонная функция этой разности, обращающаяся в нуль при  $G = G_{\min}$ .

# СТРУКТУРНАЯ СХЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ $T_p$ В СО СДВС

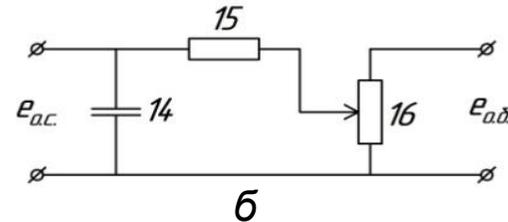
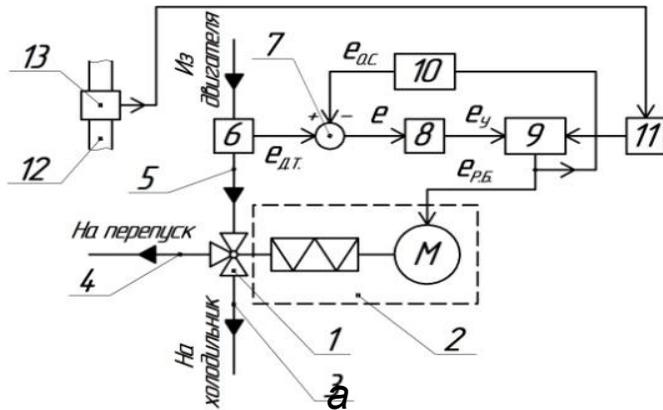
6<sub>2</sub>

- 1 – регулируемый тепловой объект – дизель;
- 2 – ДТ 3 – БС;
- 4 – задающее устройство;
- 5 – ТРГ; 6 – БУ 7 – ДН;
- 8 – холодильник;
- 9, 10, 11 – патрубки РО;
- 12 – пробка трехходового крана; 13 – электродвигатель;
- 14 – механическая связь

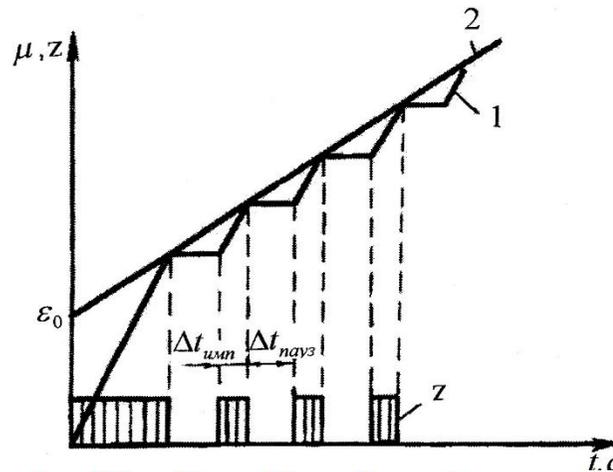
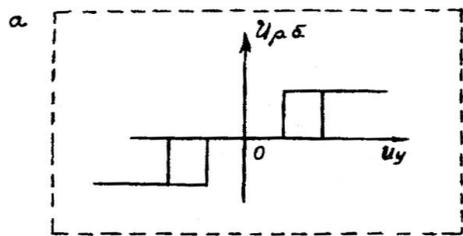


# ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА РИТРГ (Патент № 2031216)

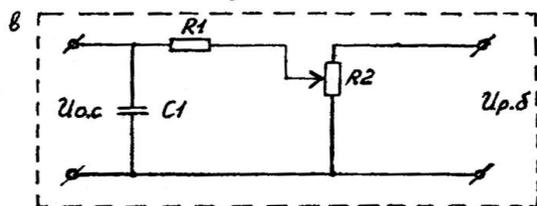
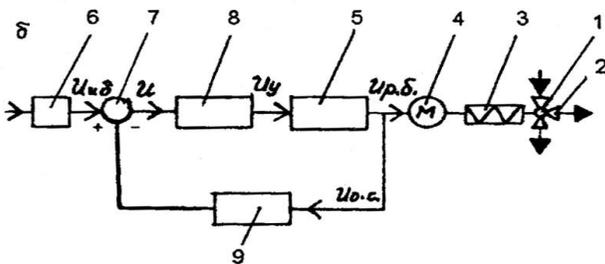
7,<sub>1</sub>



## РЕЛЕЙНО-ИМПУЛЬСНЫЙ ТРГ



- I. Релейно-импульсный ТРГ:
  - а – релейная характеристика;
  - б – основные элементы:
  - 1,2 – РО, 3,4 – ИМ,
  - 5 – релейный блок, 6 – ДТ;
  - 8 – усилитель,
  - 9 – корректирующая обратная связь;
  - в – схема обратной связи
- II. Характер перемещения ИМ постоянной скорости:



$$y = \Delta t_{имп} / t_{пер}, \quad T_{пер} = \Delta t_{имп} + \Delta t_{пауз} - \text{период следования импульсов};$$

$\Delta t_{имп}$  – длительность импульсов;

$\Delta t_{пауз}$  – длительность пауз.

Во время поступления импульса ИМ будет перемещать РО с постоянной скоростью:

$$d\mu / dt = S = tg\alpha$$

Средняя скорость перемещения РО составит

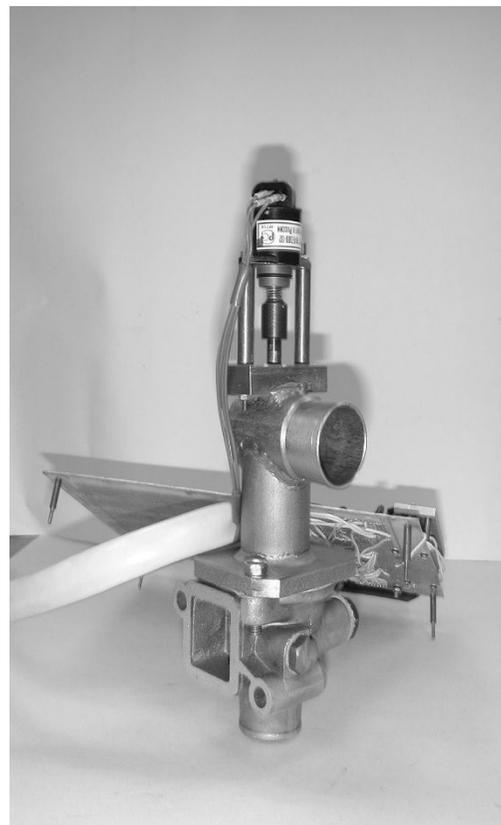
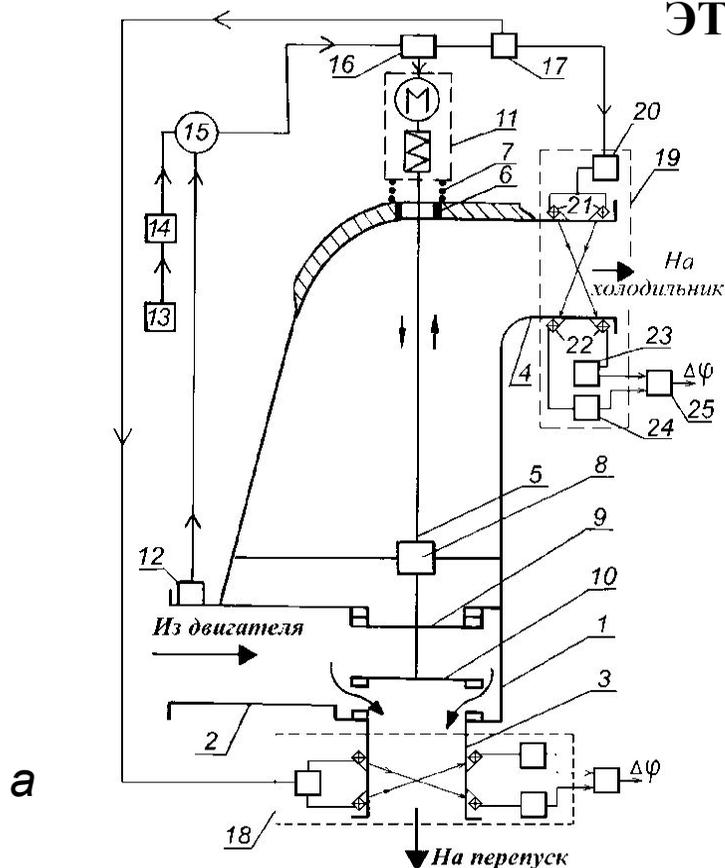
$$d\bar{\mu} / dt = tg\beta = \Delta t_{имп} s / T, \text{ или } d\bar{\mu} / dt = \gamma s. \quad |W_{и.м}(s) = \bar{M}(s) / \Gamma(s) = s / p.$$

I

II

# ЭТРГ С СЕРВОДВИГАТЕЛЕМ (Патент №2256805)

7<sub>2</sub>

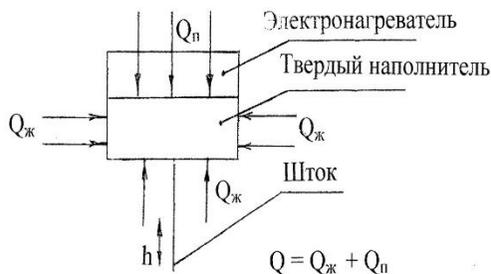


1 – корпус; 2, 3, 4 – патрубки; 5 – шток; 6 – элемент уплотнительный; 7 – пружина; 8 – втулка направляющая; 9 – клапан основной; 10 – клапан дополнительный; 11 – электрический ИМ; 12, 13 – ДТ и ДН; 14 – задатчик; 15 – БС; 16 – БУ; 17 – блок включения; 18, 19 – ультразвуковые приборы; 20 – генератор; 21 – возбудители; 22 – приемники; 23, 24 – усилители; 25 – фазометр; б – опытный образец электронного ТРГ с серводвигателем без ультразвуковых приборов

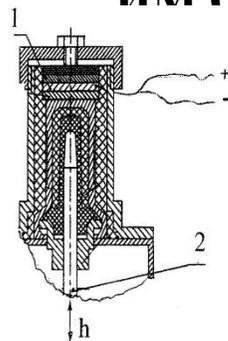
В ультразвуковых приборах 18, 19 используется фазовый расходомер 25., На частичных нагрузках, клапан 9 должен быть закрыт, следовательно, разность фаз  $\Delta\varphi = 0$ , т.е. охлаждающая жидкость не пропускается через исправный клапан 9. Если  $\Delta\varphi > 0$ , то клапан 9 неисправен. При  $\Delta\varphi \geq [\Delta\varphi_{\text{доп}}]$ , где  $|\Delta\varphi_{\text{доп}}|$  - допускаемое значение разности фаз, при котором ТРГ подлежит ремонту или замене клапанов 9, 10.

## ИМ С ТН И ЭН (Патент № 270923)

8



**а**



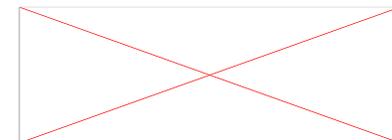
**б**



**в**

**а** – структурная схема ИМ с ТН и ЭН;  
**б** – конструктивная схема ИМ:  
 1- ЭН, 2 – ТСД);  
**в** – ТСД

Диаметр штока



где  $p_{\text{доп}}$  – допускаемое давление наполнителя, Па;  $R_{\text{max}}$  – наибольшая допускаемая нагрузка на шток, Н;  $F_{\text{сопр}}$  – силы сопротивления и трения в подвижном соединении, Н.  
 $Q_c = (Q_{\text{ж}} + Q_{\text{эн}})$  Вт

## ТРГ С ТН И ЭН

9

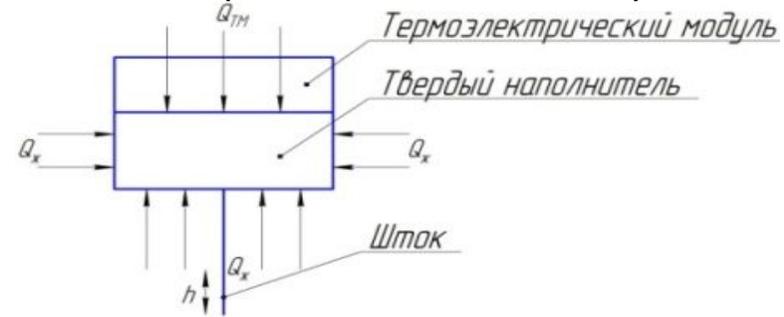
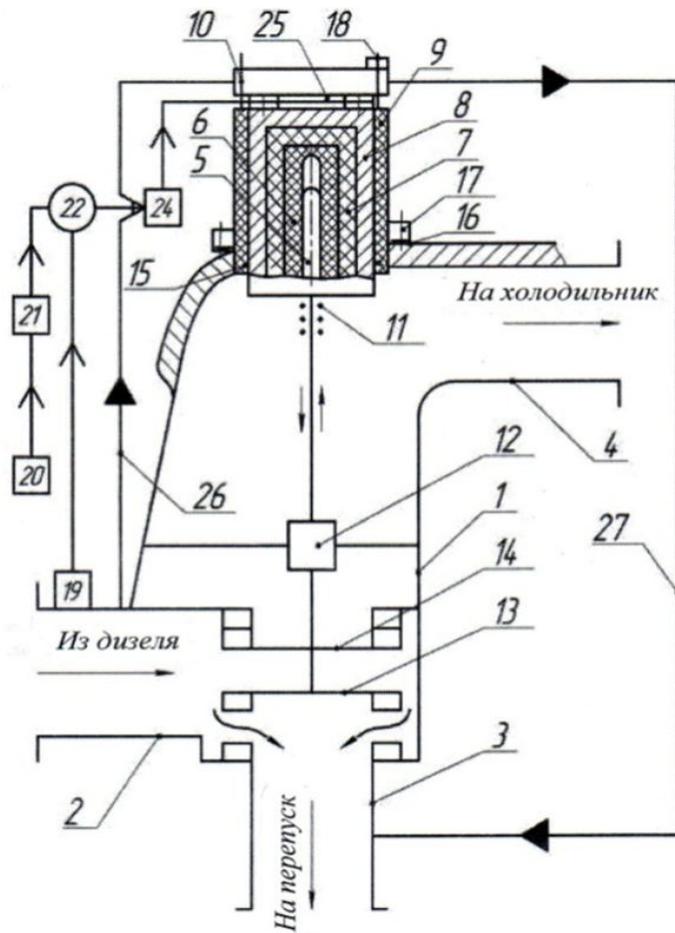
**а** - структурная схема; **б** - функциональная схема; **в** - пространственное изображение; 1- корпус; 2, 3, 4 – патрубки; 5 – шток удлиненный; 6 – втулка резиновая; 7 – ТН; 8 – баллон латунный; 9 – цилиндр теплоизоляционный; 10 – теплообменник; 11 – пружина; 12 – втулка направляющая; 13 – клапан дополнительный; 14 – клапан основной; 15 – кольцо уплотнительное; 16 – прокладка уплотнительная; 17, 18 – винты крепежные; 19, 20 – ДТ и ДН; 21 – задатчик; 22 – БС; 23 – ЭН; 24 – БУ

Передаточная функция терморегулятора выразится в виде

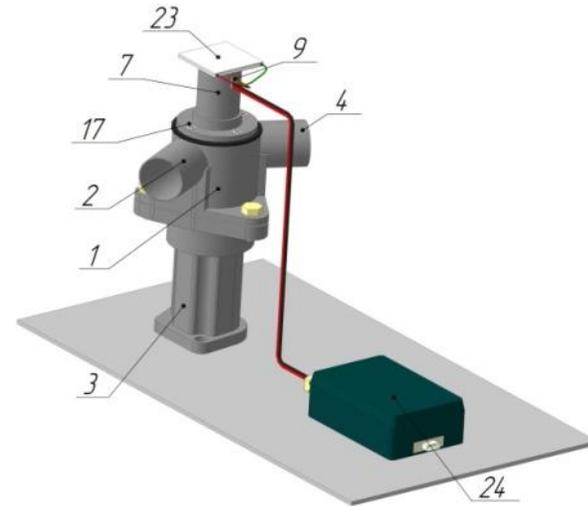
$$y_p = W_D(s)W_y(s)W_{ИМ}(s)K_{c2}K_{c3}T_p$$

ИЛИ





б



в

а

а - структурная схема; б - функциональная схема; в - пространственное изображение; 1-корпус; 2, 3, 4 – патрубки; 5 – шток удлинненный; 6 – втулка резиновая; 7 – ТН; 8 – баллон латунный; 9 – цилиндр теплоизоляционный; 10 – теплообменник; 11 – пружина; 12 – втулка направляющая; 13 – клапан дополнительный; 14 – клапан основной; 15 – кольцо уплотнительное; 16 – прокладка уплотнительная; 17, 18 – винты крепежные; 19, 20 – ДТ и ДН; 21 – задатчик; 22 – БС; 23 – ЭН; 24 – БУ

Передаточная функция терморегулятора выразится в виде

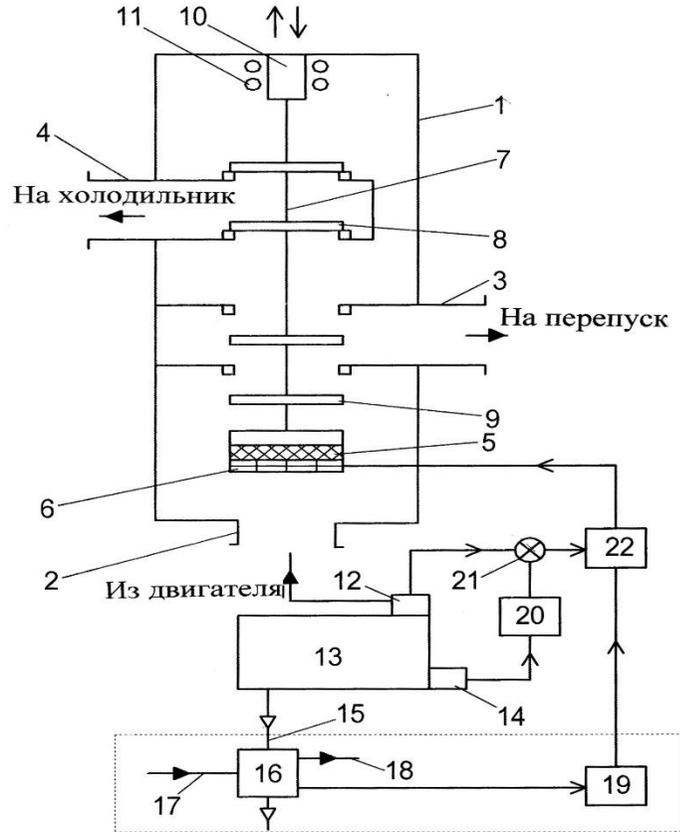
$$y_p = W_D(s)W_y(s)W_{ИМ}(s)K_{c2}K_{c3}T_p \text{ или } y_p = W_p(s)T_p$$

Термосилового датчик с твердым наполнителем, под которым понимается время от момента начала изменения температуры термосилового датчика до момента трогания штока.

$$T_{c.д} \frac{dy_{c.д}}{dt} + y_{c.д} = k_{c.д} x_{c.д}(t - t_o).$$

# ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРГ С ТМ (Патент №2204030)

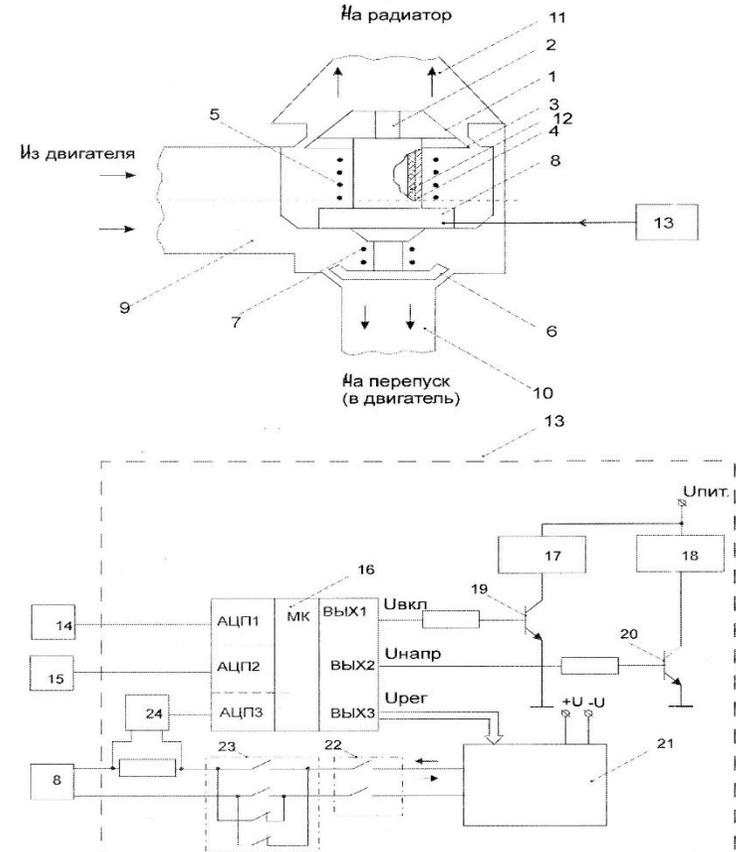
10<sub>2</sub>



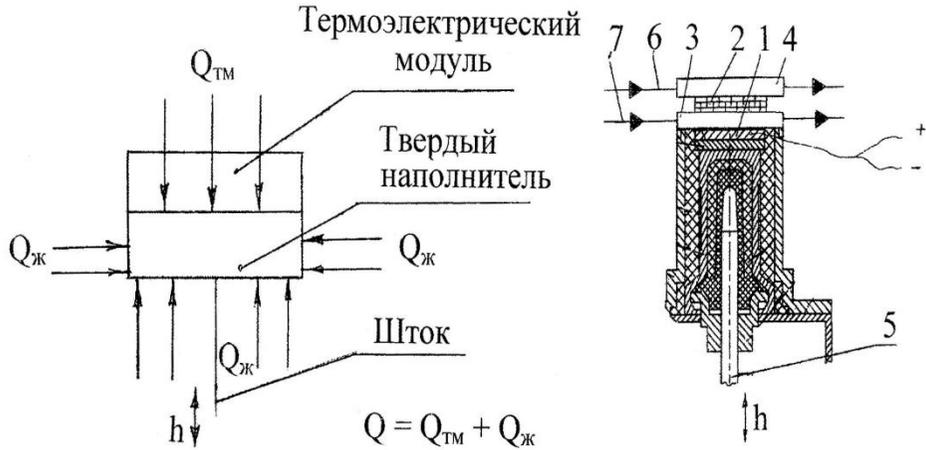
1 – корпус; 2, 3, 4 – патрубки; 5 – ТН; 6 – ТМ;  
7 – шток; 8, 9 – клапаны; 10 – направляющая втулка;  
11 – пружина; 12, 14 – ДТ, ДН;  
13 – двигатель; 15 – канал выхлопной трубы;  
16 – термоэлектрический генератор;  
17; 18 – каналы охлаждающей жидкости;  
19 – блок питания; 20 – датчик; 21 – БС; 22 – БУ

# ПРОГРАММИРУЕМЫЙ ТРГ С ТМ (Патент № 2256805)

10<sub>3</sub>

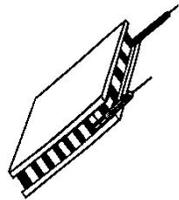


1 – корпус ТРГ; 9, 10, 11 – патрубки; 2 – шток;  
3 – клапан основной; 4 – баллон; 5, 7 – пружина;  
6 – клапан перепускной; 8 – ТМ; 12 – ТН;  
13 – программируемый БУ; 14, 15 – ДТ, ДН;  
16 – микроконтроллер; 17, 18 – реле; 19, 20 – ключи;  
21 – регулятор источника тока; 22 – контакты  
включения и выключения ТМ; 23, 24 – контакты



а

б



в

а – структурная схема;

б – конструктивная схема:

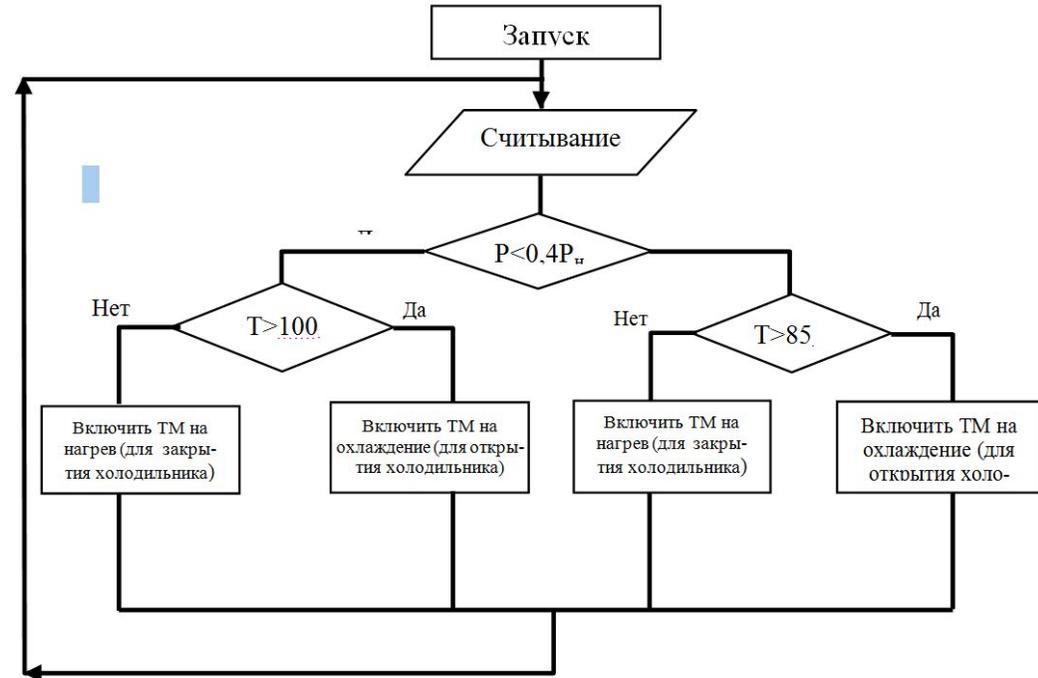
1 – ТН; 2 – ТМ;

3,4 – теплообменники;

5 – шток;

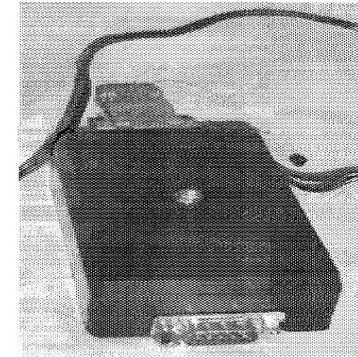
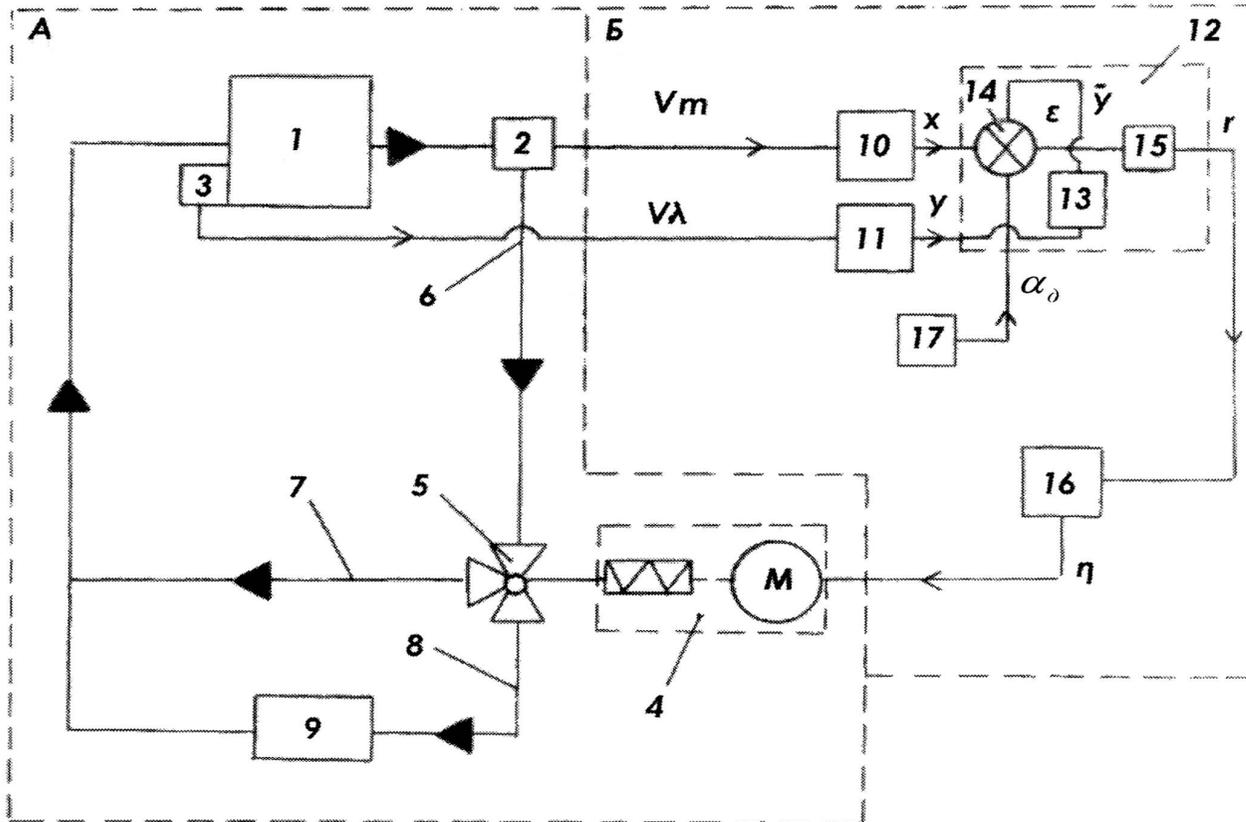
6,7 – каналы охлаждающей воды;

в - ТМ



$$T_{c.d} \frac{dy_{c.d}}{dt} + y_{c.d} = k_{c.d} x_{c.d}, \text{ где } k_{c.d} = \frac{\Delta T_{oc}}{T_{oc.d}} = 1$$

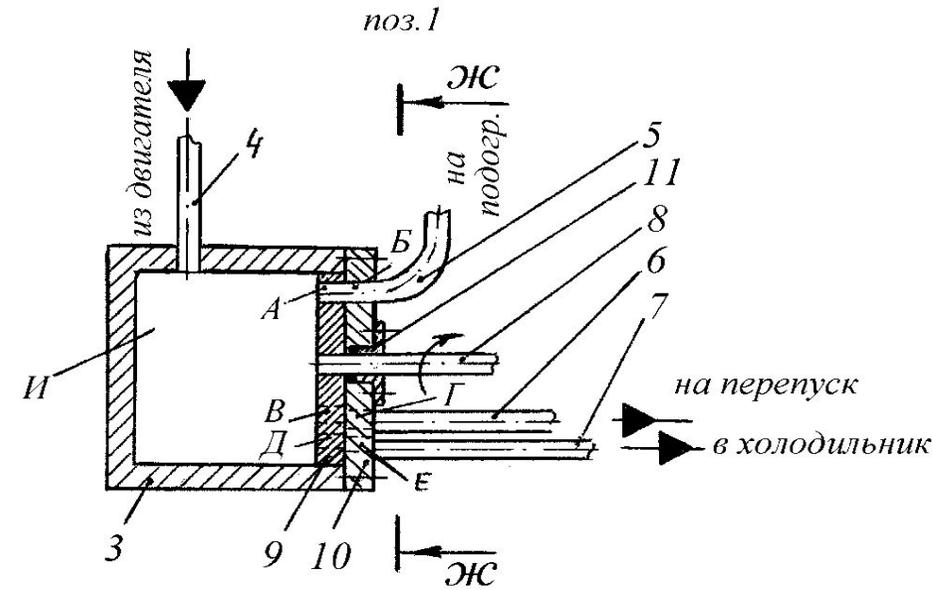
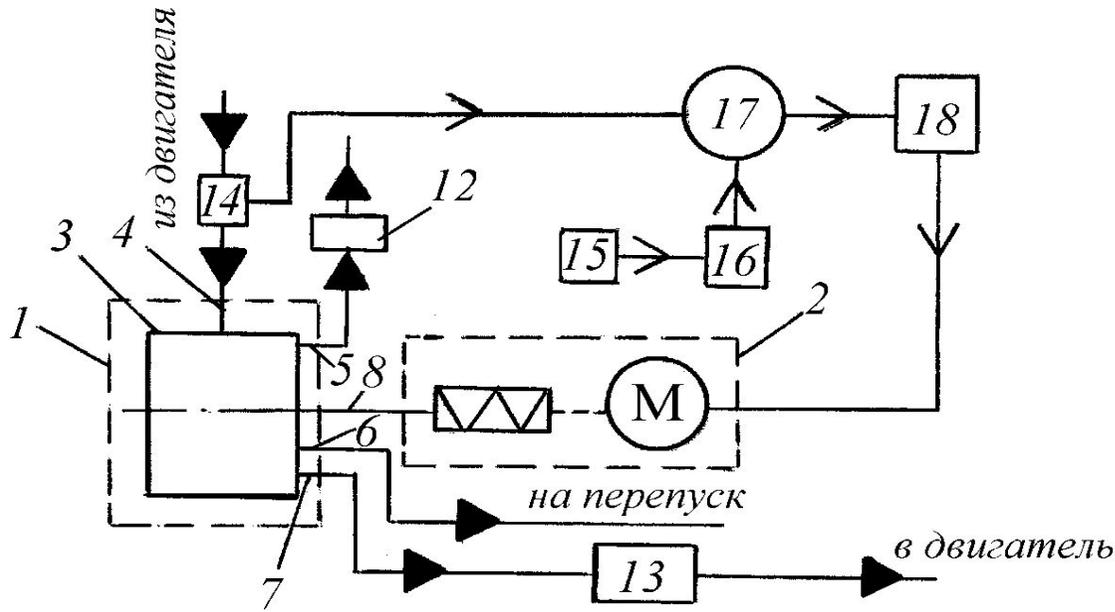
– передаточный статический коэффициент



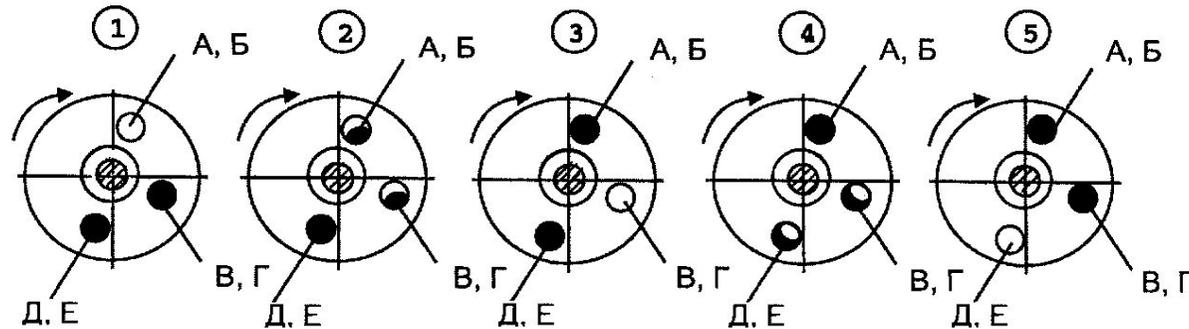
микропроцессорный блок управления

А - непрерывная часть, Б - дискретная часть

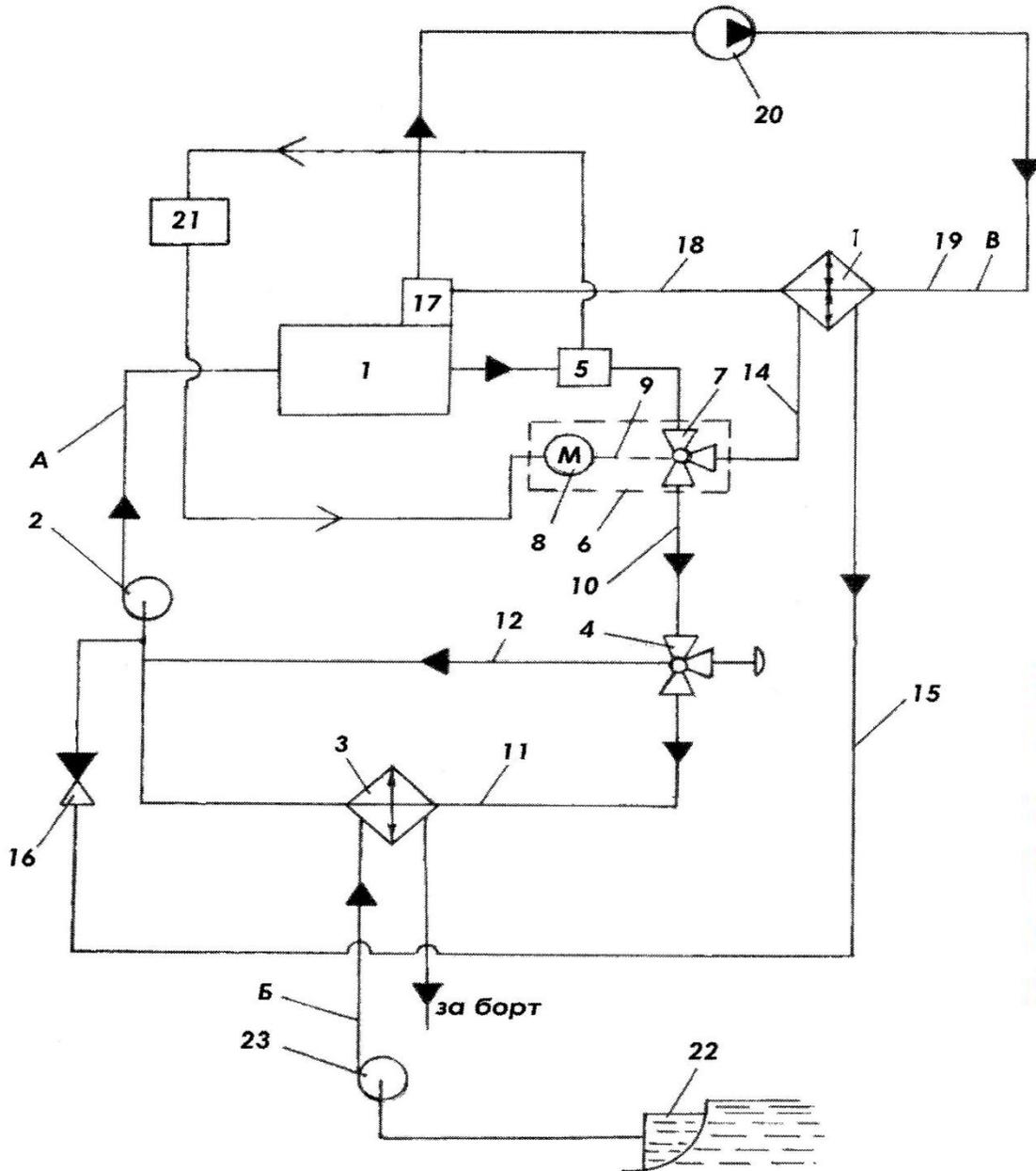
1 - двигатель, 2 - ДТ, 3- ДН, 4 - ИМ, 5 - РО, 6,7,8 - каналы охлаждающей жидкости, 9 - холодильник, 10,11 - АЦП, 12 - микроконтроллер, 13 - компенсирующий узел, 14 - блок сравнения, 15 - регулирующий узел, 16 - ЦАП, 17 - задатчик.



ЖС-ЖС



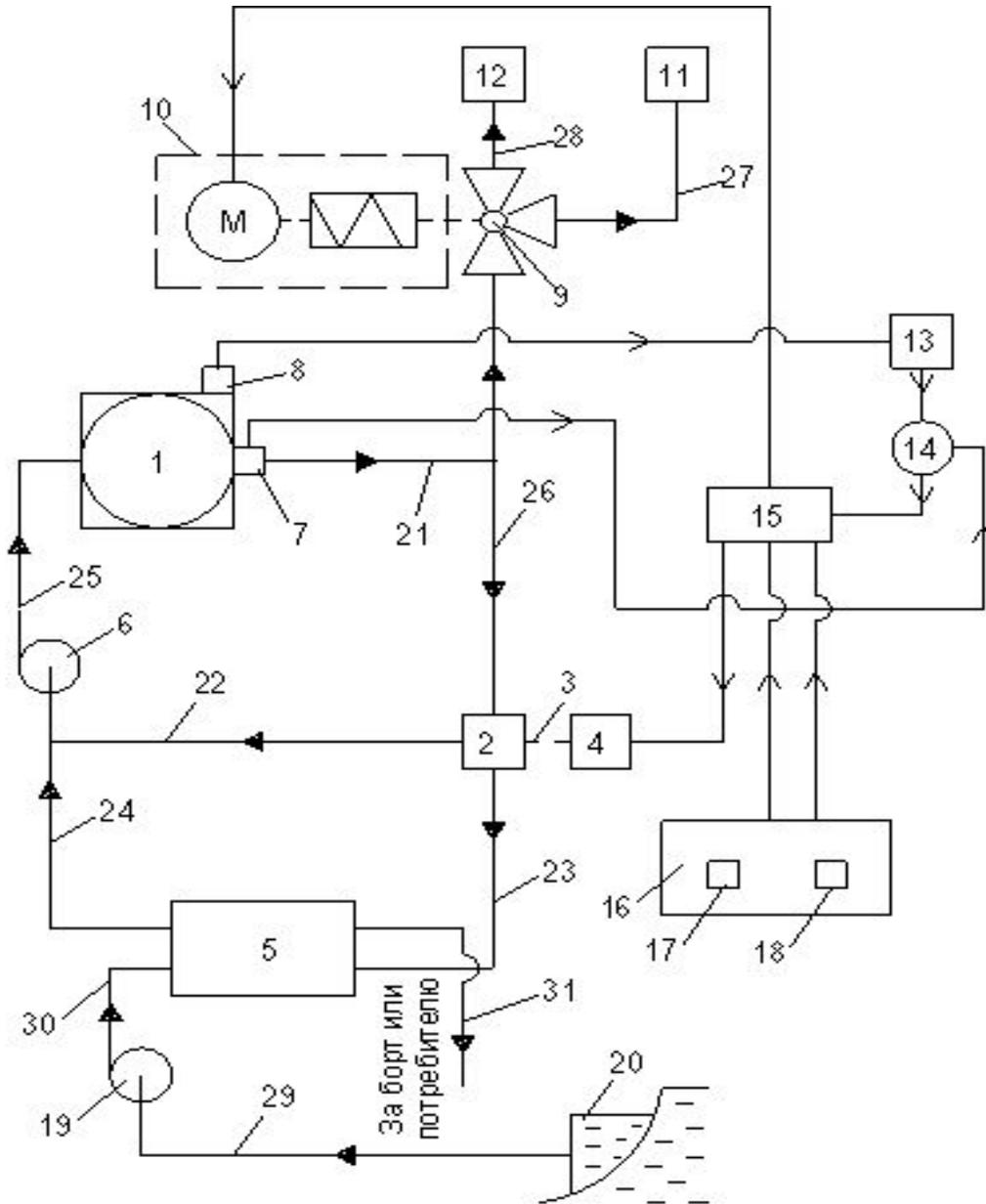
1 – РО; 2 – электрический ИМ; 3 – корпус РО; 4, 6, 7 – патрубки; 5 – патрубок дополнительный;  
 8 – вал; 9 – клапан вращающийся; 10 – крышка; 11 – сальник-уплотнитель; 12 – подогреватель;  
 13 – холодильник; 14, 15 – ДТ, ДН; 16 – задатчик; 17 – БС; 18 – БУ



- А – внутренний контур;
- Б – внешний контур;
- В – система утилизационного котла;
- 1 – дизель; 4,6 – ТРГ; 5 – ДТ;
- 10,11,12,14,15,18,19 – каналы системы;
- 2,23,20 – насосы, 16 - клапан невозвратный;
- 17 – котел утилизационный;
- 3 – холодильник; 13 – подогреватель;
- 21 – БУ; 22 – ящик заборный

Количество теплоты, выделяемой в СО дизелем на номинальных нагрузках:  
 $Q_{\text{дв.н}} = aP_e b_e Q_H$ , Теплота, передаваемая, подогревателем во внутренний контур СО  
 $Q_{\text{под}} = Q_{\text{дв.н}} - Q_{\text{дв.тек}}$ ;  
 где  $Q_{\text{дв.тек}}$  - теплота, выделяемая дизелем в СО на частичных нагрузках.

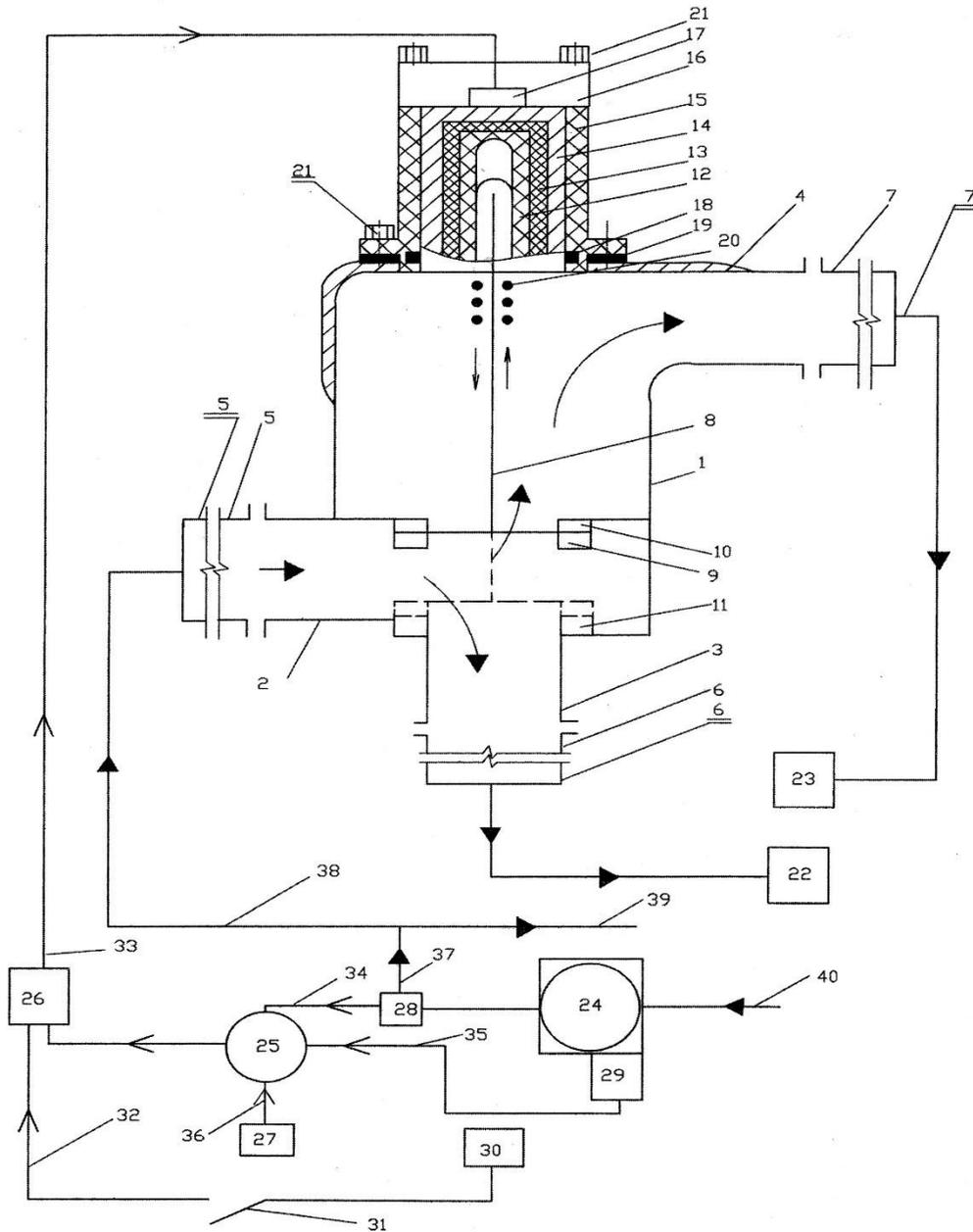
Таким образом,  $Q_{\text{под}} = f(P_e)$ .



- 1 – двигатель; 2 – ТРГ;  
 3 – механическая связь;  
 4 – электрический ИМ;  
 5 – теплообменник;  
 6 – циркуляционный насос; 7 – ДТ;  
 8 – ДН; 9 – трехходовой кран;  
 10 – электрический ИМ;  
 11 – расширительный бачок;  
 12 – паровоздушный клапан;  
 13 – задатчик; 14 – БС; 15 – БУ;  
 16 – эксплуатационный пульт управления с переключателями вариантов;  
 17 – переключатель «Ходовой вариант»;  
 18 – переключатель «Маневренный вариант»;  
 19 – циркуляционный насос внешнего контура; 20 – кингстон;  
 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31 – каналы охлаждающей жидкости

# ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ ОТКРЫТОЙ СО НА ЗАКРЫТУЮ СО

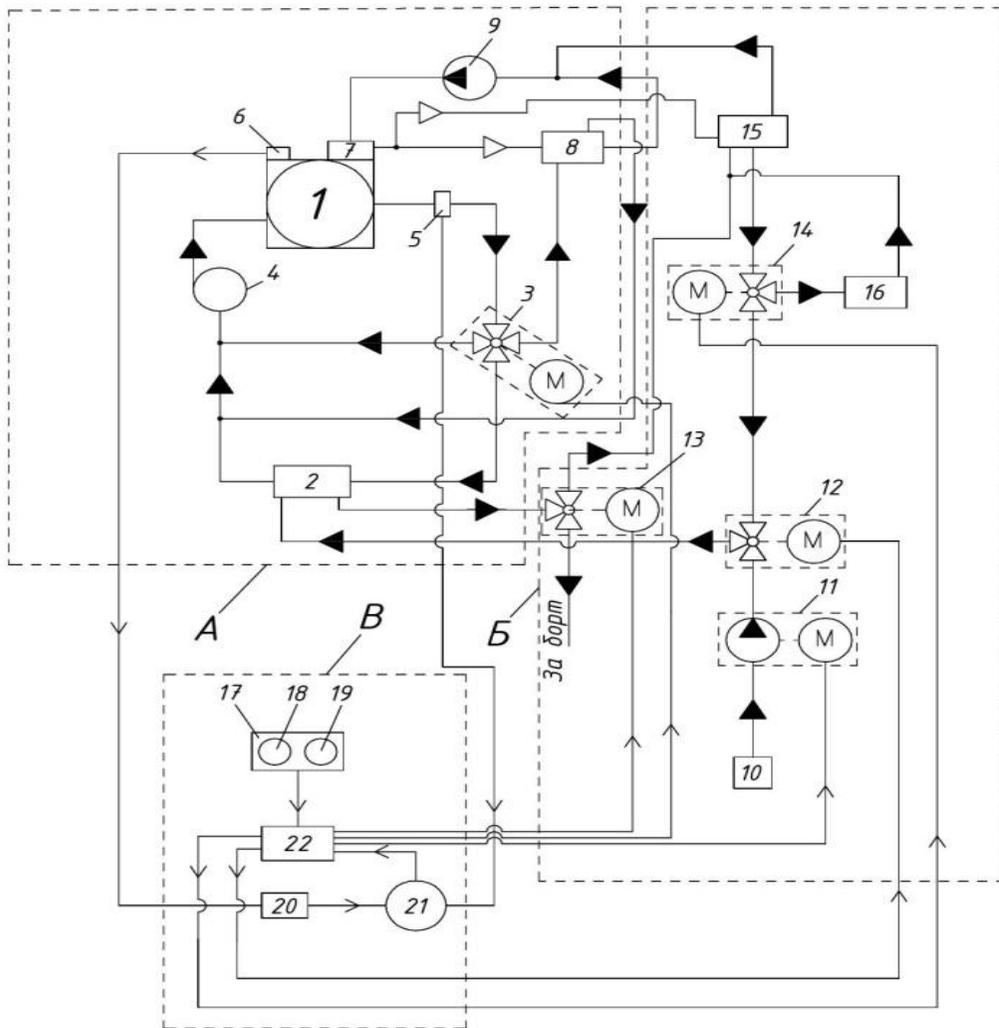
14<sub>3</sub>



- 1 – корпус; 2,3,4 – патрубки переключателя;
- 5,6,7 – каналы охлаждающей воды;
- 8 – шток; 9 – клапан регулирующий;
- 10,11 – седла клапана; 12 – втулка;
- 13 – ТН; 14 – стакан; 15 – цилиндр теплоизоляционный; 16 – теплообменник;
- 17 – ЭН; 18,19 – кольца уплотнительные;
- 20 – пружина; 21 – винты крепежные;
- 22 – расширительный бачок открытого типа;
- 23 – расширительный бачок закрытого типа;
- 24 – дизель; 25 – БС;
- 26 – БУ; 27 – задатчик; 28,29 – ДТ, ДН;
- 30 – блок питания;
- 31 – контакт замыкающий;
- 32,33 – каналы подачи электроэнергии;
- 34,35,36 – каналы подачи сигналов;
- 37,38,39,40 – каналы охлаждающей воды

# СО СУДОВОГО ДВС С АБХМ

14<sub>4</sub>



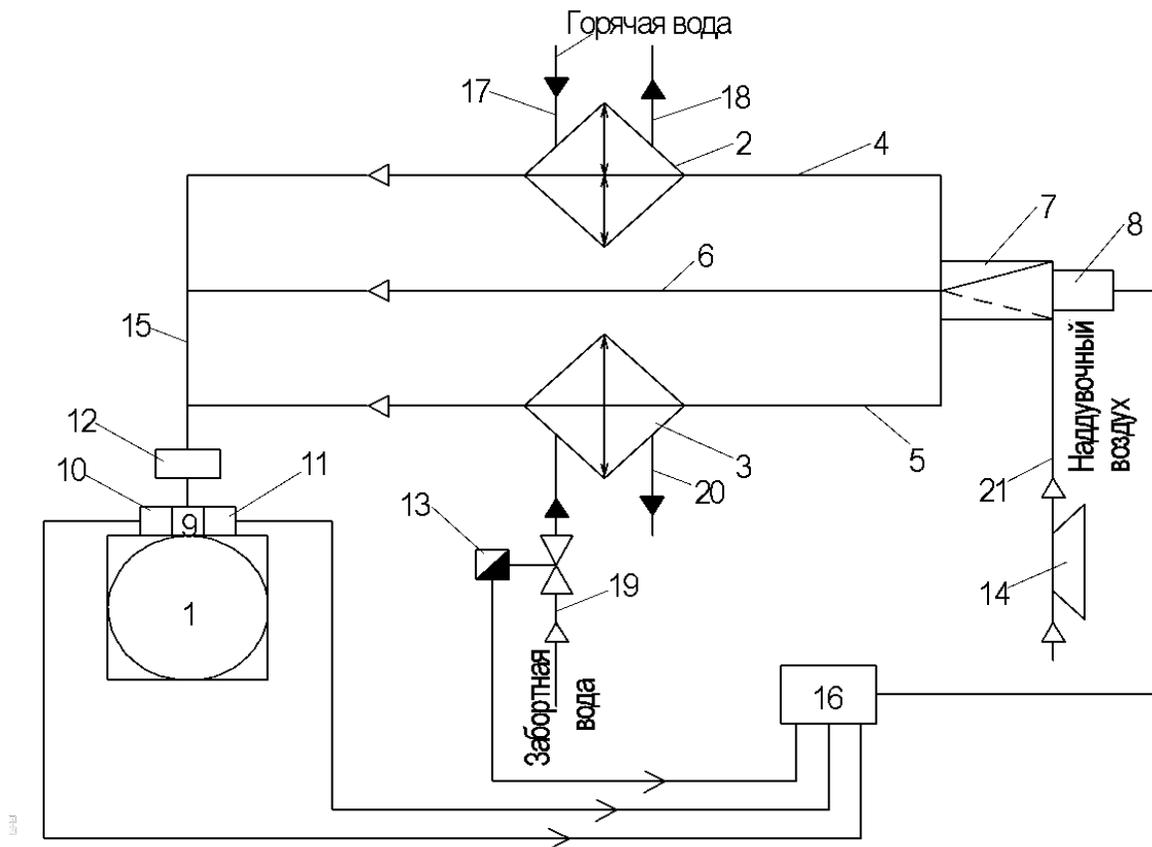
- А – внутренний контур: 1 – дизель;  
2 – жжх; 3 – многофункциональный ТРГ с четырехходовым краном (МТРГ);  
4 – циркуляционный насос; 5,6 – ДТ и ДН;  
7 – УК; 8 – теплообменник;  
Э – циркуляционный насос; Б – внешний контур: 10 – кингстон; 11 – электрический насос; 12, 13, 14 – электрические ТРГ;  
15 – АБХМ; 16 – потребитель хладоносителя;  
B – контур управления:  
17 – пульт управления,  
18 – переключатель режима забортной воды;  
19 – переключатель режима АБХМ;  
21 – БС; 22 – БУ

Абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины — АБХМ утилизацией ОГ позволяют получать холодную воду с температурой 5—8° С .

# СИСТЕМА НВ СДВС (Патент №2184251)

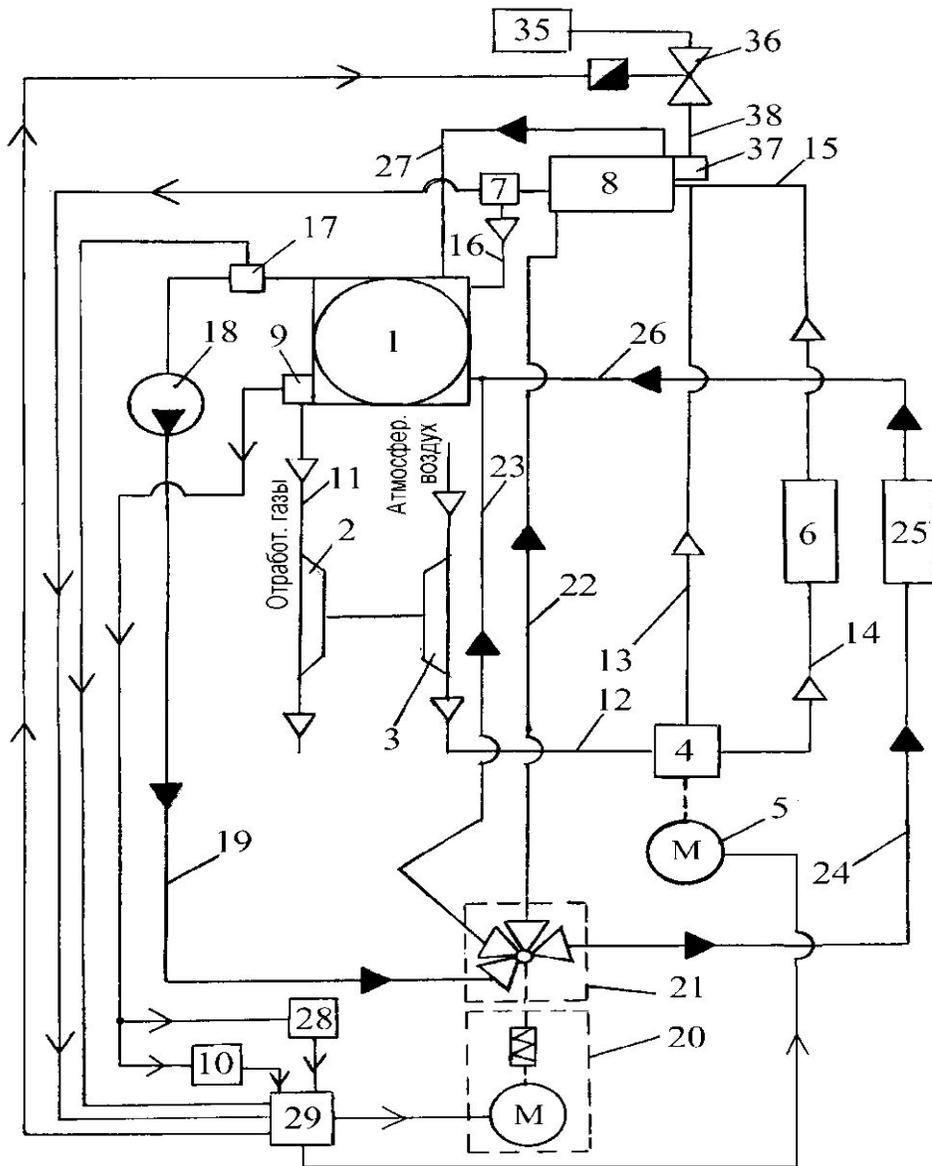
15,<sub>1</sub>

1 – дизель; 2, 3 – «холодный», «горячий» теплообменники;  
4, 5, 6, 15, 21 – каналы подачи воздуха; 7 – распределитель;  
8 – ИМ; 9 – электрический психрометр;  
10, 11, 12 – датчики психрометра, ДН, температуры НВ; 13 – электромагнитный клапан;  
14 – турбокомпрессор; 16 – БУ;  
17, 18 – каналы подвода и отвода источника подогрева



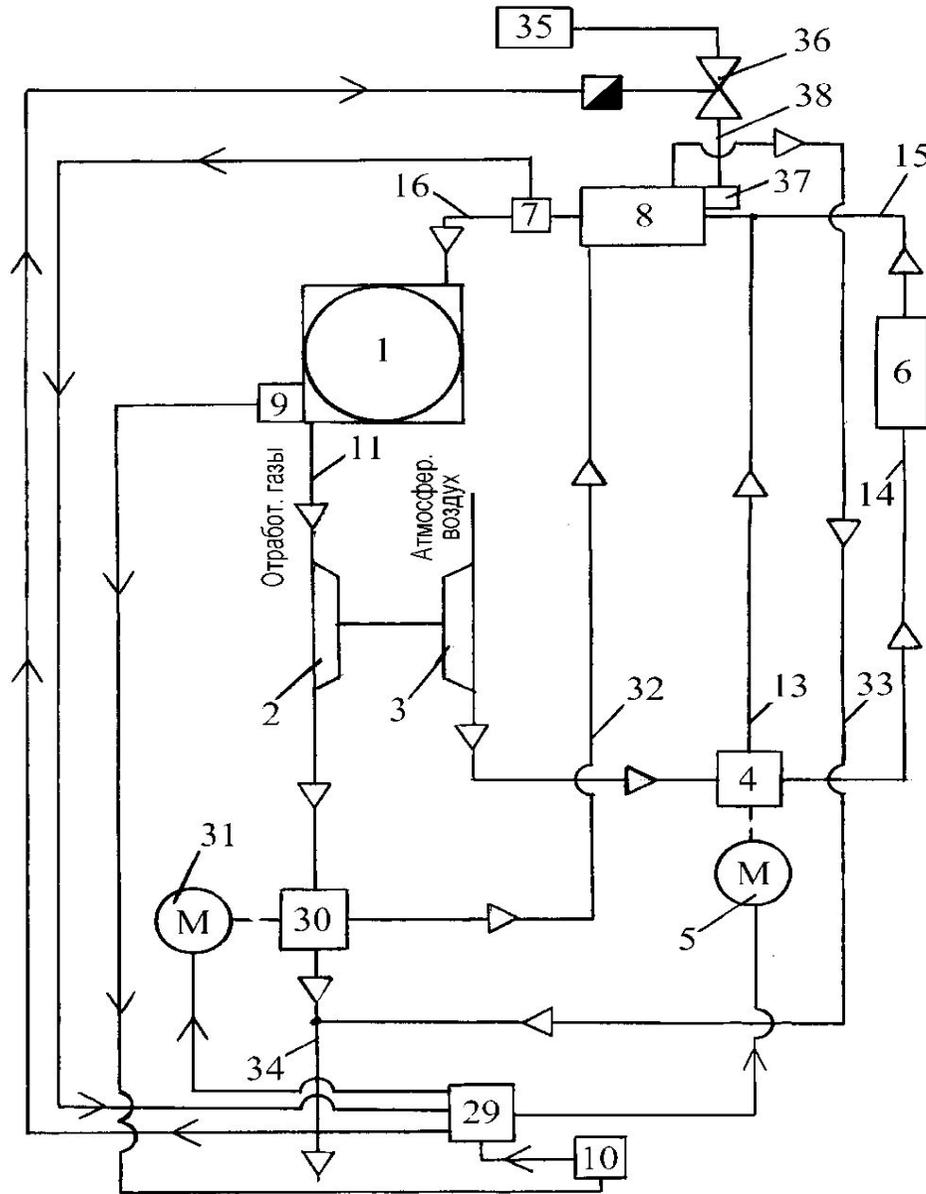
# СО НВ ДВС (Патент №2251021)

15<sub>2</sub>



- 1 – дизель; 2 – газовая турбина;  
 3 – турбокомпрессор; 4 – распределитель НВ;  
 5 – электродвигатель; 6 – охладитель НВ; 7, 9 – ДТ, ДН; 8 – теплообменник;  
 10 – задатчик температуры НВ;  
 11 – канал ОГ; 12, 13, 14, 15, 16 – каналы НВ;  
 17 – ДТ СО; 18 – циркуляционный насос; 20 – ИМ; 21 – четырехходовой кран; 22, 23, 24, 26, 27 – каналы СО;  
 25 – охладитель; 28 – задатчик СО;  
 29 – БУ; 35 – емкость с жидким хладагентом;  
 36 – электромагнитный клапан; 37 – дозатор;  
 38 – канал подачи хладагента

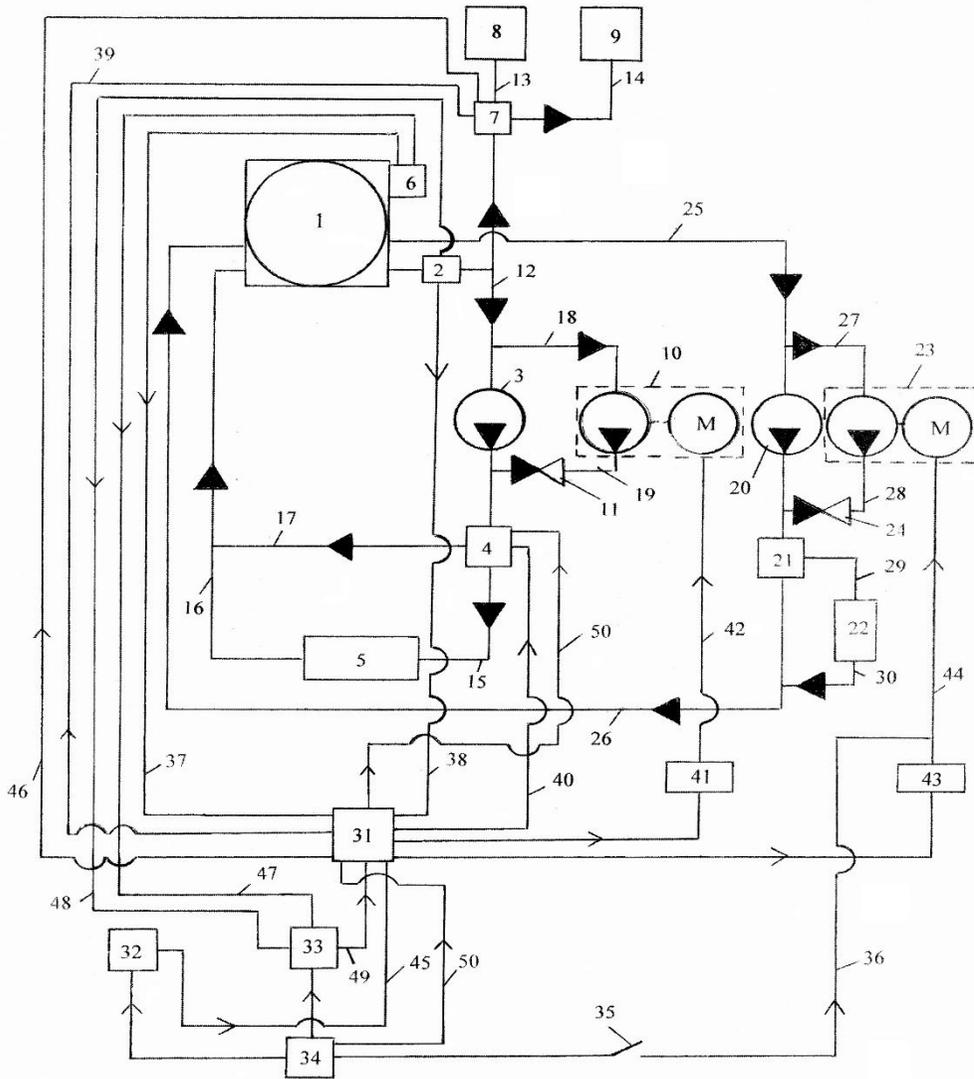
$P_e \leq 0,4 P_{ен}$  – подогрев;  
 $P_e \geq 0,4 P_{ен}$  – охлаждение



$P_e \leq 0,4 P_{ен}$  – подогрев;  
 $P_e \geq 0,4 P_{ен}$  – охлаждение

# СИСТЕМА АВАРИЙНОЙ ОСТАНОВКИ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ (Патент №76983)

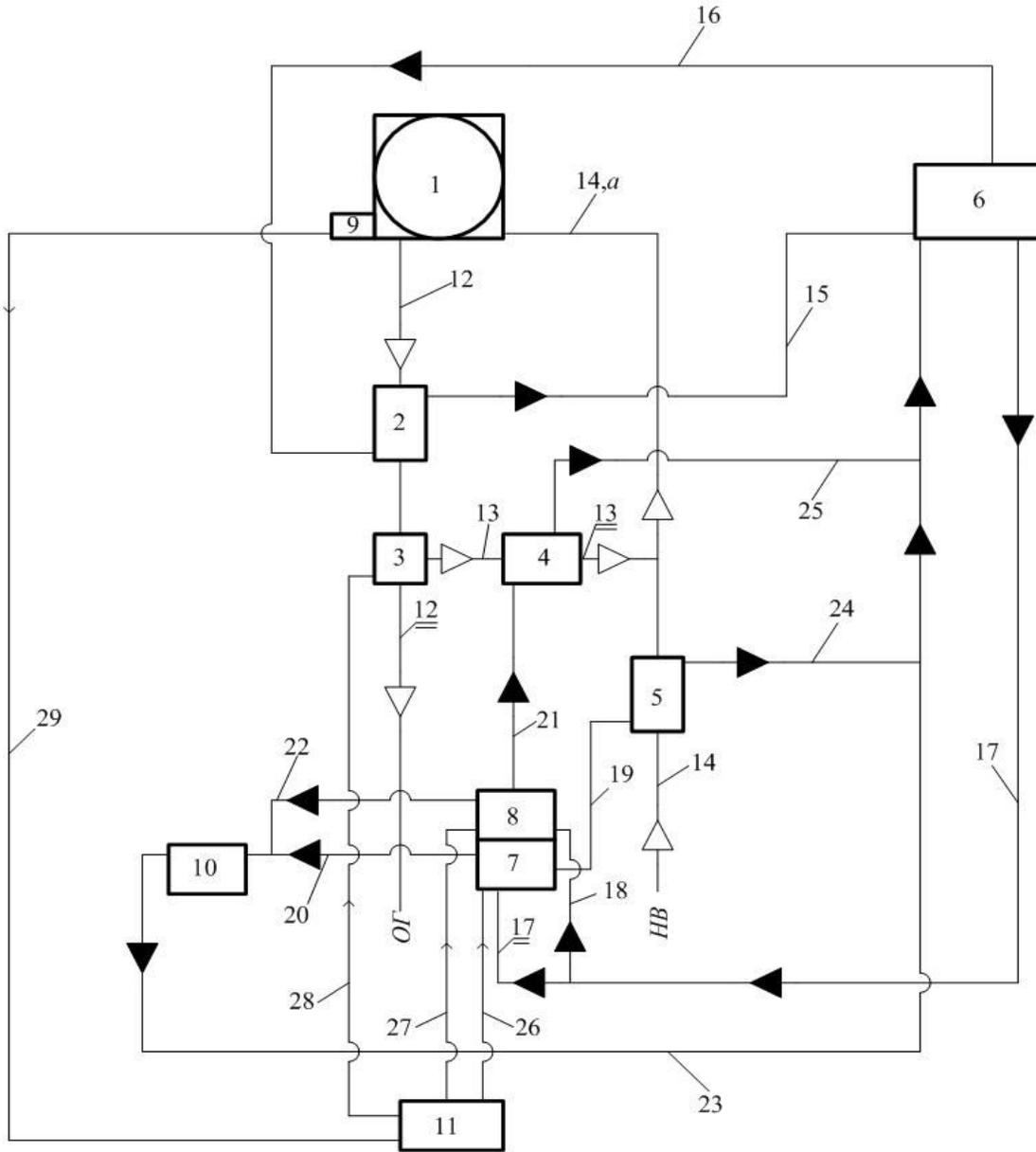
16



- 1 – дизель; 2 – ДТ 0; 3 – водяной насос;
- 4 - ТРГ; 5 – теплообменник;
- 6 – ДН; 7 – распределитель охлаждающей жидкости (электрический);
- 8 – расширительный бачок с паровоздушным клапаном;
- 9 – расширительный бачок;
- 10 – электрический водяной насос;
- 11 – невозвратный клапан;
- 12-19 – каналы СО; 20 – масляный насос; 21 – ТРГ масляный; 22 – теплообменник; 23 – насос масляный электрический;
- 24 – невозвратный клапан;
- 25-30 – каналы ССМ; 31 – БУ;
- 32 – блок плановой остановки;
- 33 – блок аварийной остановки;
- 34 – блок питания; 35 – контакт замыкающий; 36, 42, 44 – каналы подачи электроэнергии; 37-40 – каналы подачи сигналов; 41, 43 – реле времени;
- 45-50 – каналы подачи электрических сигналов

# «ХОЛОДНАЯ» РЕЦИРКУЛЯЦИЯ СДВС (Патент №2466289)

17

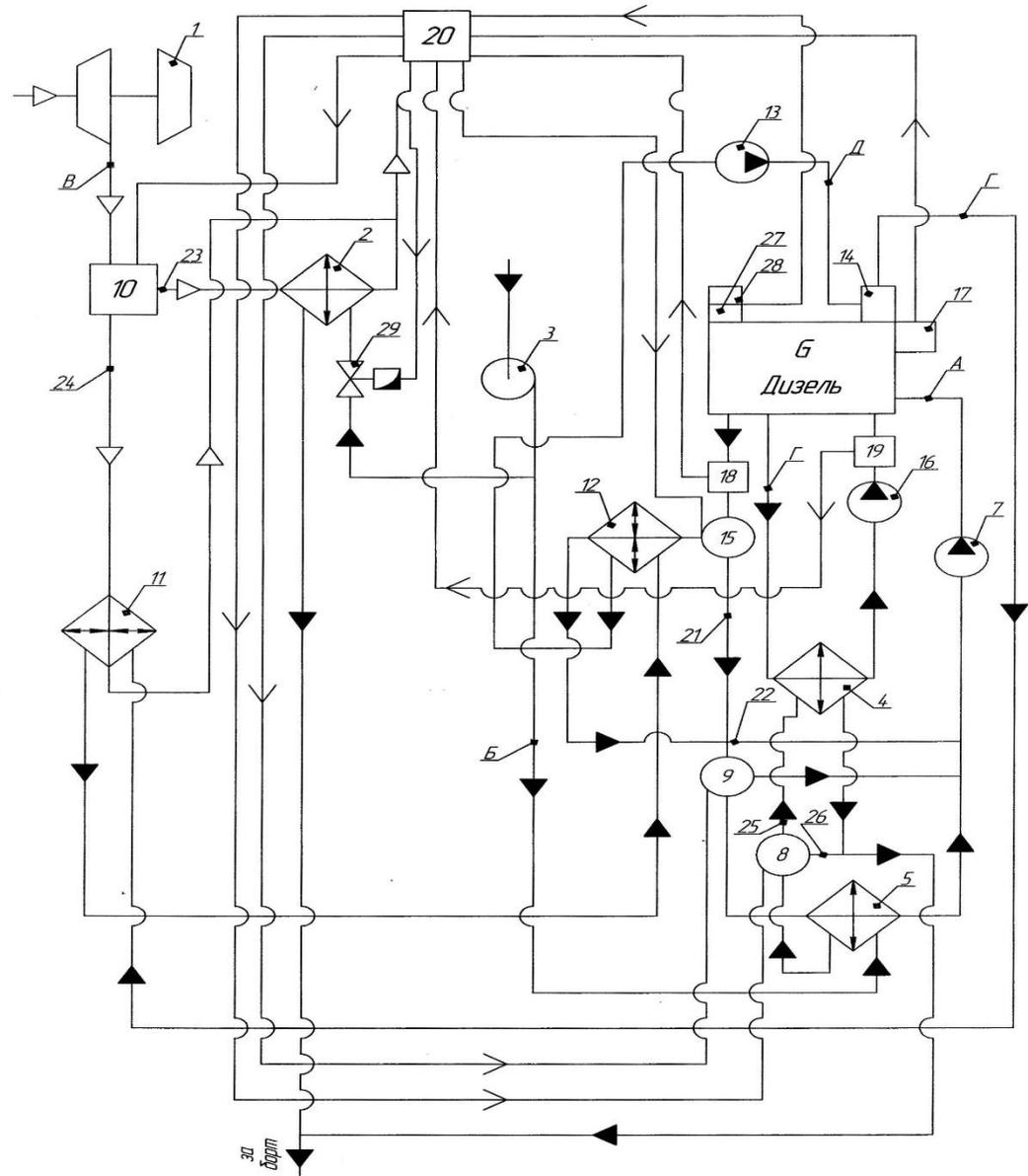


1 – дизель; 2 – УК; 3 – распределитель ОГ;  
4 – охладитель ОГ; 5 – охладитель НВ;  
6 – АБХМ; 7, 8 – электронные ТРГ;  
10 – потребитель; 11 – БУ 12 - канал ОГ;  
13 – рециркуляционный канал; 14,а – канал  
НВ и ОГ; 14 – канал НВ; 15,16 – каналы  
теплоносителя системы УК;  
17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 – каналы  
хладаносителя; 26, 27, 28 – каналы подачи  
электроэнергии; 29 – канал подачи  
электрического сигнала

«Холодная» рециркуляция: уменьшается  
подогрев воздушного заряда от ОГ, улучшается  
наполнение цилиндра свежим зарядом, снижается  
температура цикла, улучшается рабочий процесс,  
уменьшается эмиссия  $\text{NO}_x$ .

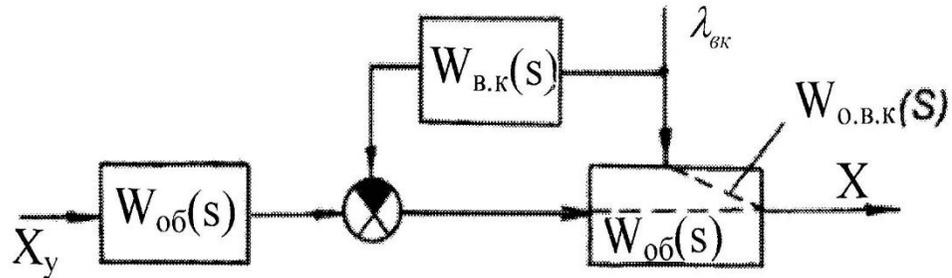
Раствор бромистого лития обеспечивает  
устойчивую работу АБХМ при температуре  
кипения воды в испарителе 276-279 К. Водный  
раствор соли бромистого лития  
пожаровзрывобезопасен и нетоксичен, все  
процессы протекают вакуумом, (6÷8 мм рт. ст.)

- 1 – агрегат наддува; 2 – ОНВ; 3 – насос заборной воды;
- 4 – охладитель масла;
- 5 – охладитель внутреннего контура; 6 – дизель; 7 – насос внутреннего контура,
- 8 – ТРГ масла; 9 – ТРГ;
- 10 – распределитель НВ; 11 – подогреватель НВ;
- 12 – дополнительный подогреватель; 13 – насос,
- 14 – УК; 15 – ТРГ; 16 – масляный насос; 17 – ДН;
- 18 – ДТ; 20 – БУ;
- 21,22 – каналы охлаждения; 23,24 – каналы НВ;
- 25,26 – каналы смазки



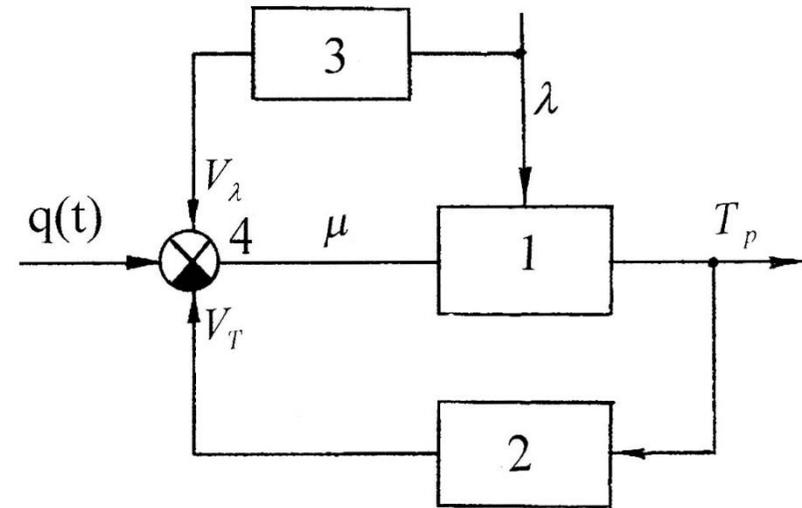
Регулирование температуры в СО,  
ССМ, СНВ

## СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО ВОЗМУЩЕНИЮ



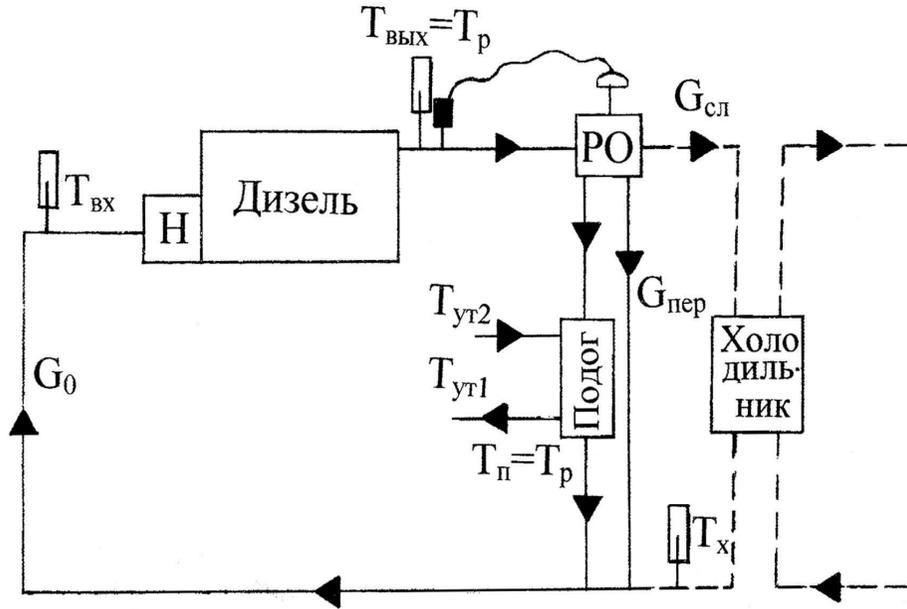
Сочетание метода компенсации с принципом обратной связи

## КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА САРТ



- 1 – объект регулирования;
- 2 – автоматический регулятор температуры;
- 3 – компенсатор;
- 4 – блок сравнения

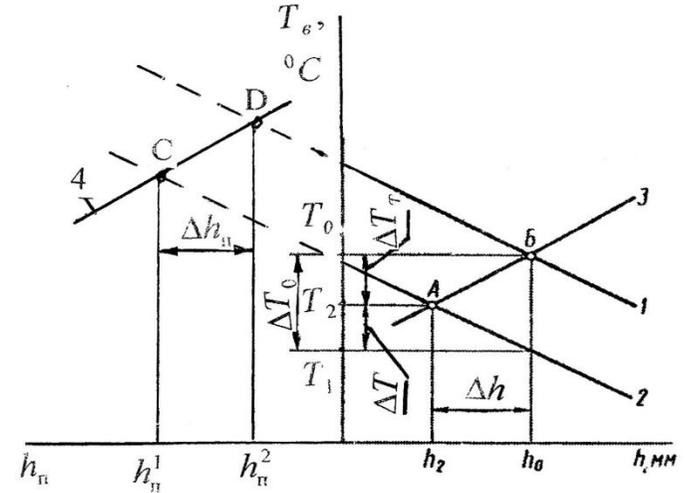
# СХЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В СО СПОСОБОМ ПЕРЕПУСКА



$$\Delta T = T_p - 95^\circ C; \quad \Delta T = T_p - 80^\circ C.$$

Если  $\Delta T < 0$ , то система включится на подогрев. Если  $\Delta T > 0$ , то система подогрева-охлаждения включится на охлаждение

# СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТА И ТЕРМОРЕГУЛЯТОРА



- 1 – характеристика регулируемого объекта при 100% нагрузки;
- 2 – характеристика регулируемого объекта при 25% нагрузки;
- 3 – характеристика ТРГ в СО;
- 4 – характеристика ТРГ в системе подогрева;

$h$  – величина регулирования клапанов в холодильнике;  
 $h_n$  – величина регулирования клапанов в подогревателе  
 $K_0 = \frac{\Delta T}{\Delta h}$  – коэффициент усиления регулируемого объекта

$$\Delta T_0 = T_0 - T_1, \quad \Delta T_\tau = T_0 - T_2.$$

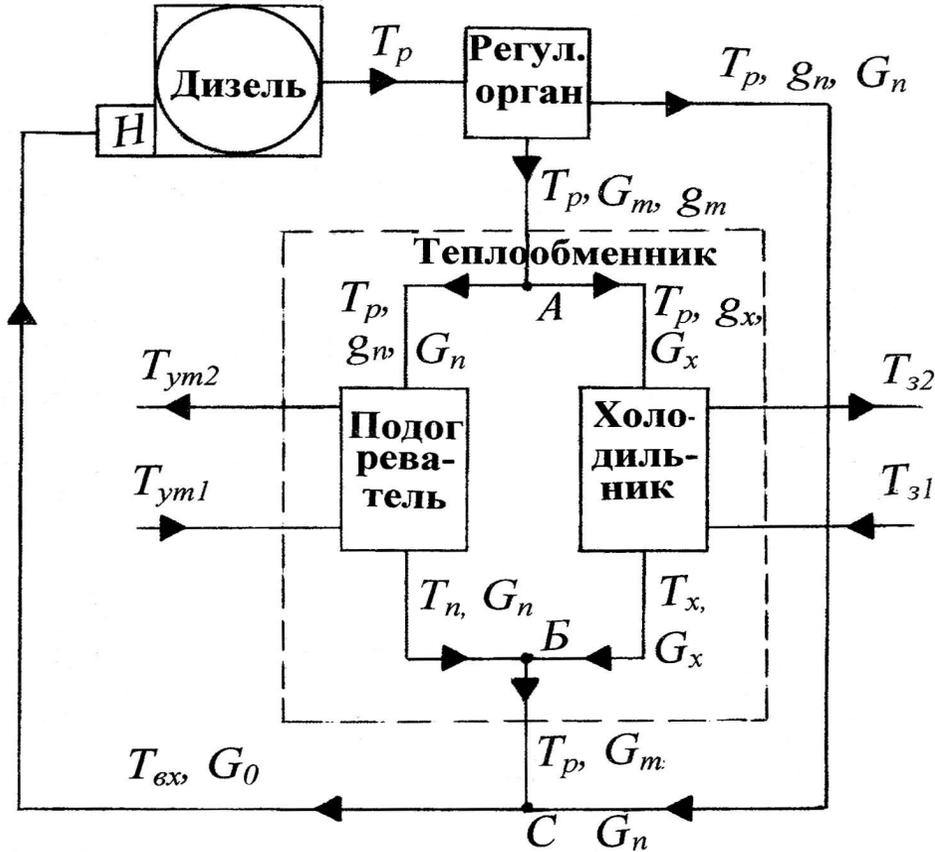
$$\Delta T_0 - \Delta T_\tau = T_2 - T_1 = \Delta T.$$

$\Delta T = K_0 \Delta h$ , где  $\Delta h = h_0 - h_2$  – перемещение клапана

терморегулятора охлаждающей воды на величину  $\Delta T_\tau$ .

$$\Delta T_0 - \Delta T_\tau = K_0 K_\tau \Delta T_\tau, \text{ откуда } \Delta T_\tau = \frac{\Delta T_0}{1 + K_0 K_\tau}.$$

# СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СПО ПЕРЕПУСКОМ



Уравнение динамики по каналу нагрузочного воздействия

$$(T_{a\lambda} s + 1) Y_0 = K_{o\lambda} \lambda, \text{ где } T_{a\lambda} = \frac{C}{c g_x G_0 + \alpha_d F_d};$$

$$K_{0\mu} = \frac{c G_0 (T_{p0} - \xi T_{r0}) g_{xN}}{c g_r G_0 - \alpha_d F_d T_{pN}} = K_{0\mu} \frac{g_N}{T_{pN}}; Y_0 = \frac{\Delta T_p}{T_{pN}} \text{ и } \lambda = \frac{\Delta T_{r0}}{T_{rN}};$$

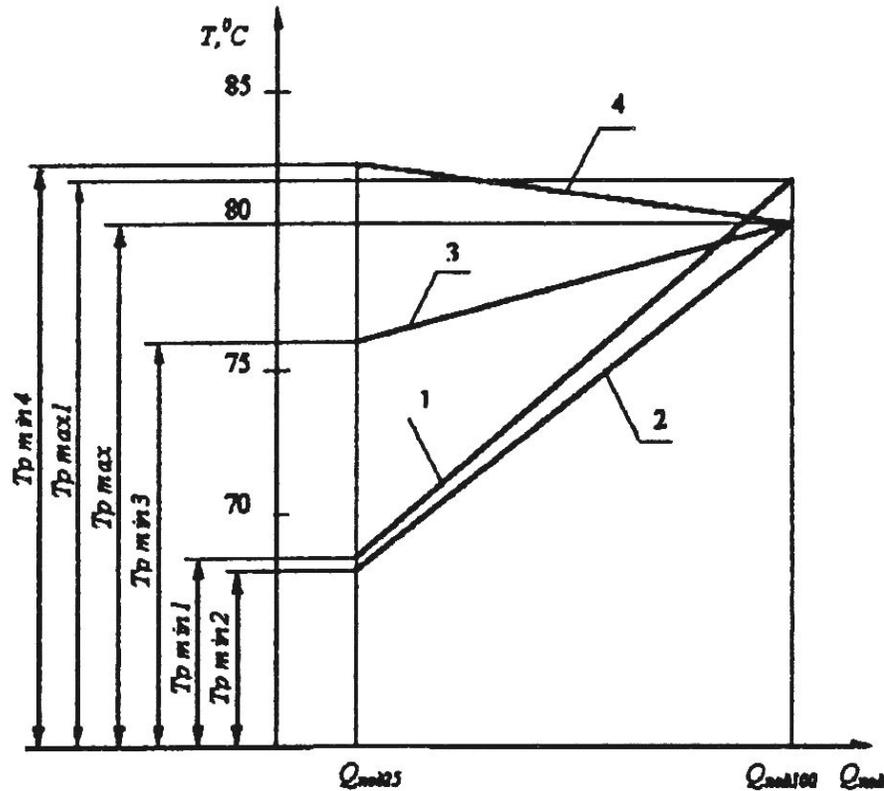
$$W_{0\lambda}(s) = \frac{K_{0\lambda}}{T_{a\lambda} s + 1} e^{-\tau_{0\lambda} s}$$

Уравнение динамики по каналу регулирующего воздействия

$$(T_{a\mu} s + 1) Y_0 = - K_{o\mu} \mu, \text{ где } \mu = \frac{\Delta g_r}{g_{rN}}; T_{a\mu} = \frac{C}{c g_x G_0 + \alpha_d F_d};$$

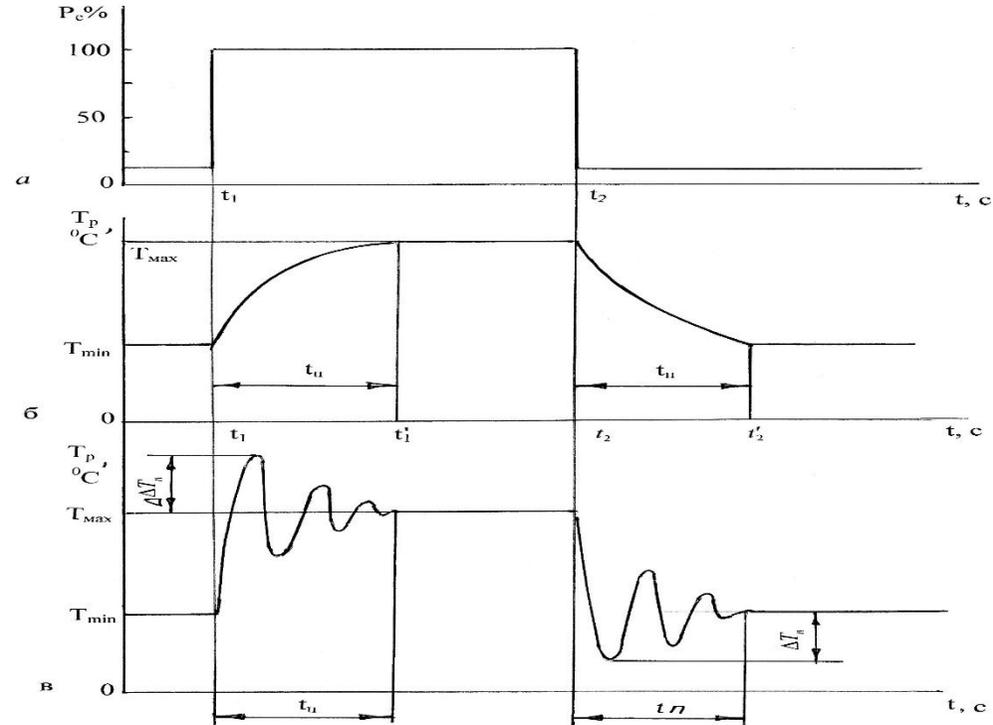
$$K_{0\mu} = \frac{c G_0 (T_{p0} - \xi T_{r0}) g_{xN}}{c g_r G_0 - \alpha_d F_d T_{pN}} = K_{0\mu} \frac{g_N}{T_{pN}}; W_{0\mu} = \frac{K_{0\mu}}{T_{0\mu} s + 1} e^{-\tau_{0\mu} s}$$

# СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ САРТ ДИЗЛЯ



1 - без учета регулятора; 2 – с учетом регулятора; 3 – с подогревом внешних источников; 4 – с подогревом внешних источников с «отрицательной» характеристикой;  
 $T_x$  – температура воды после холодильника

# ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ САРТ ДИЗЕЛЯ 21

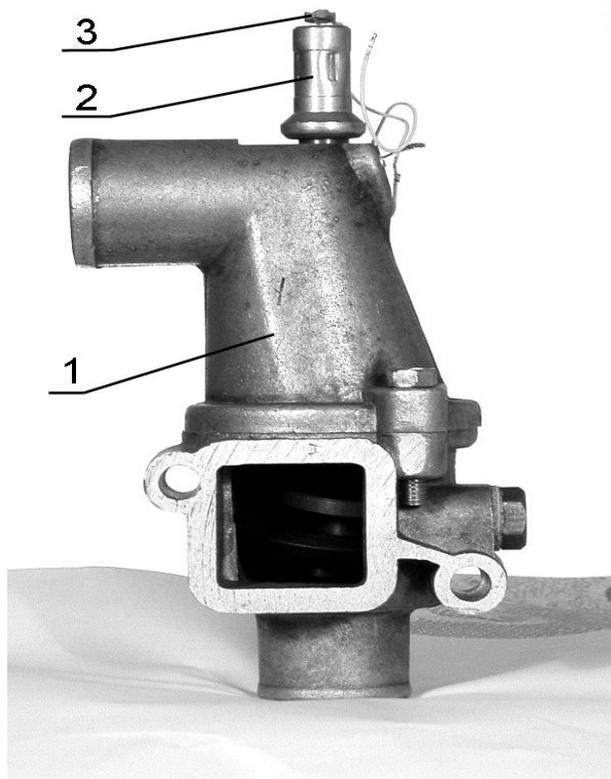


а – динамическая характеристика нагрузки дизеля;  
 б – апериодическая характеристика СА  
 РТ; в – колебательная динамическая характеристика САРТ  
 дизеля

На рис. б приведена кривая переходного процесса изменения температуры при значении параметров настройки ПИ регулятора при  $K, T_{и}$ . Переходный процесс имеет апериодический характер. Динамическая характеристика САРТ показывает, как изменяется регулируемая температура при переходе от одного установившегося значения к другому вследствие изменения нагрузки. Увеличением  $K_p, T_{и}$  переходный процесс приобретает в колебательный характер.

# ТРГ С ТН И С НАГРЕВАТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

22<sub>1</sub>

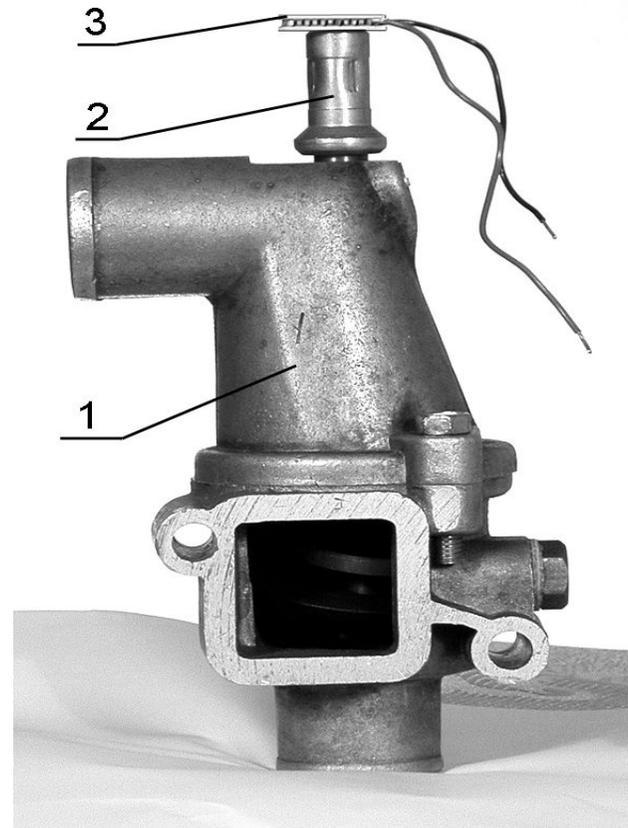


С электронагревателем:

1 – корпус, 2 – ТСД, 3 – ЭН

Технические характеристики электронагревателя ЭНЭС -7А:

Рабочее напряжение, В	24;
Сопротивление, Ом	6,6;
Температура переключения, °С	140;
Габаритные размеры: Ø, s	18±2, 2.



С термоэлектрическим элементом:

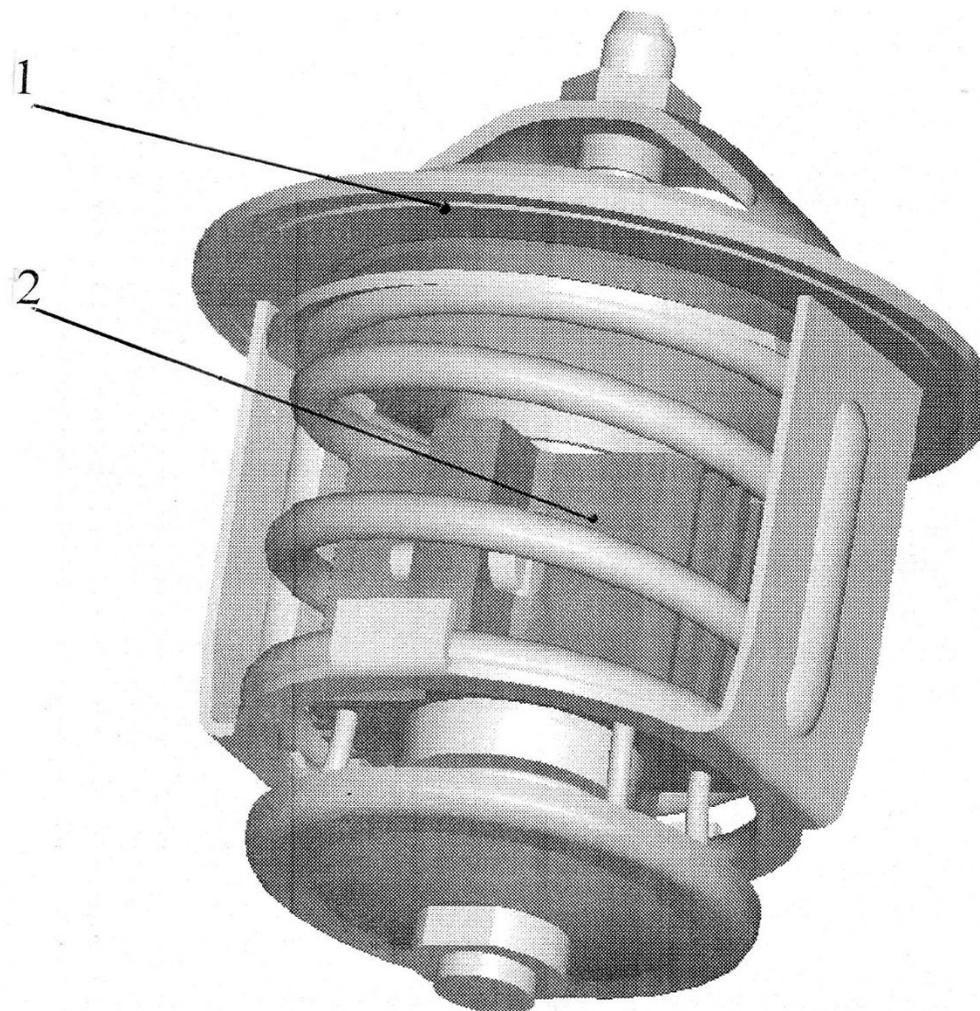
1 – корпус, 2 – ТСД, 3 – ТМ

Основные технические характеристики ТОМ 8 – 127

Максимальный ток $I_{max}$ , А	6,0
Максимальное напряжение $U_{max}$ , В	15
Максимальная холодопроизводительность $Q_{max}$ , Вт	50
Перепад температур, $\Delta T_{max}$ , °С	77
Сопротивление переменному току, Ом (при 22°С)	2,2±0,2;
Размер, мм	40x40x3,9;
Масса без проводов, г	22.

## МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ТРГ С ТМ

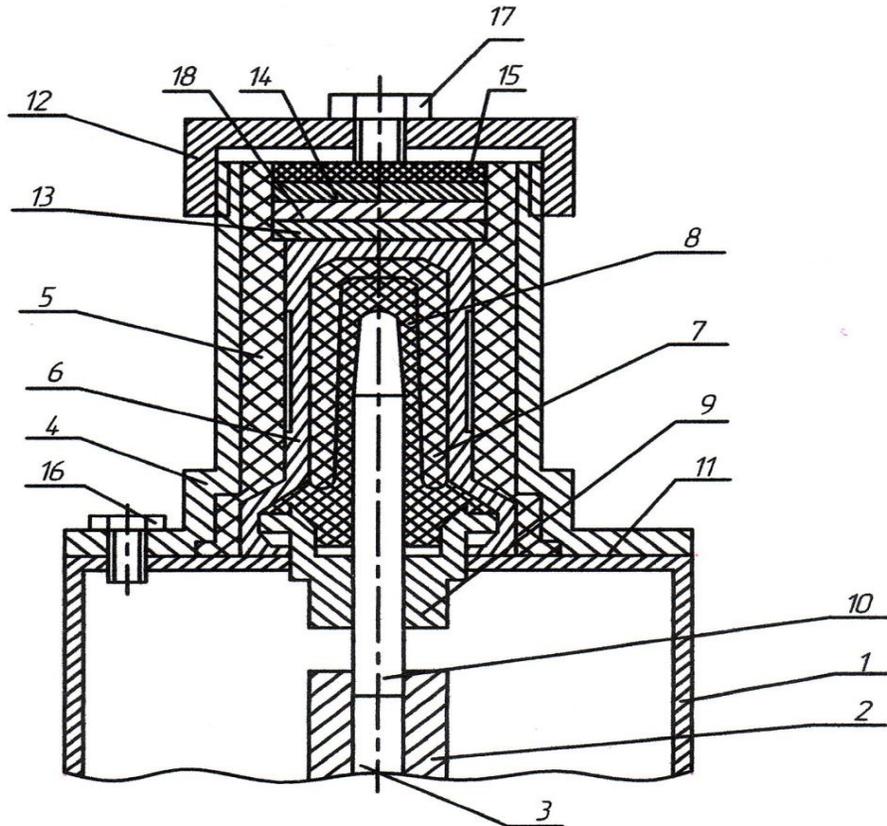
22<sub>2</sub>



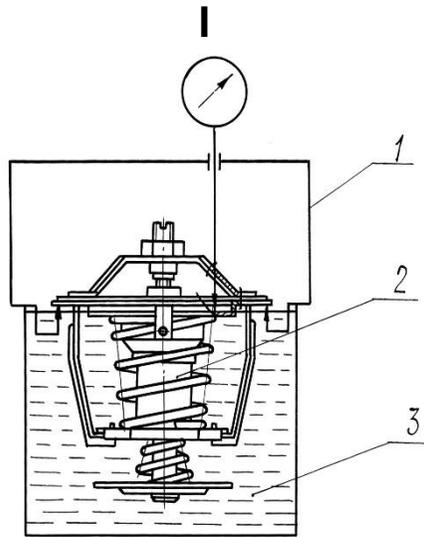
1 – штатный терморегулятор; 2 – термоэлектрический блок

КОНСТРУКТИВНЫЙ ЧЕРТЕЖ ТРГ С  
ТН И ЭН

ОПЫТНЫЙ ОБРАЗЕЦ

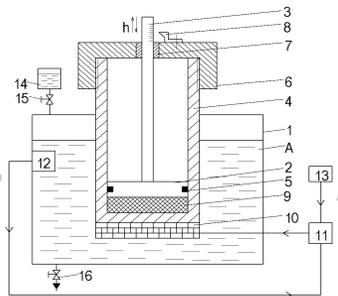


- 1 – корпус ТРГ, 2 – втулка, 3 – шток, 4 – корпус ЭН,  
5 – теплоизолятор, 6 – гильза, 7 – ТН, 8, 9 – втулка,  
10 – шток, 11 – прокладка, 12 – гайка, 13, 14 – контакты,  
15 – шайба, 16, 17 – винты крепежные, 18 – ЭН (позистор)

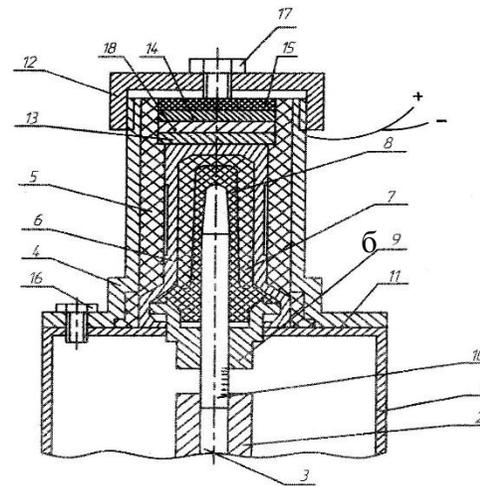
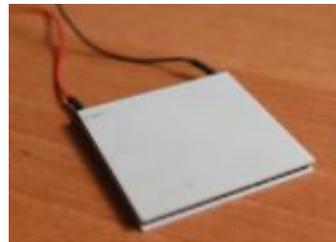


1 – приспособление с индикаторной стойкой; 2 – термостат; 3 – термованна

### III



**Макет ТРГ с ТН и ТМ:** 1 – корпус емкости установки; 2 – поршень; 3 – шток; 4 – цилиндр; 5 – кольцо уплотнительное; 6 – крышка; 7 – втулка направляющая; 8 – указатель; 9 – ТН; 10 – ТМ; 11 – БУ; 12 – ДТ; 13 – ДН; 14 – расходный бачок, 15, 16 – вентили; А - резервуар установки; б – ТМ ТОМ 8 – 127



**ТРГ с ТН и ЭН:** 1 – корпус ТРГ, 2 – втулка, 3 – шток, 4 – корпус ЭН, 5 – теплоизолятор, 6 – гильза, 7 – ТН, 8, 9 – втулка, 10 - шток, 11 – прокладка, 12 – гайка, 13, 14 – контакты, 15 – шайба, 16, 17 – винты крепежные, 18 – ЭН

### II

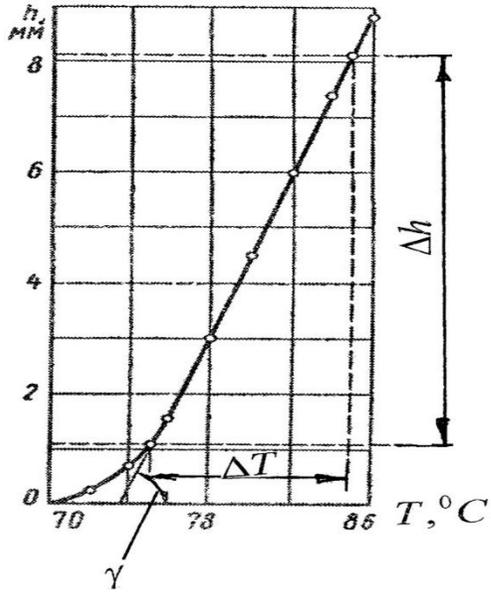
Технические характеристики электронагревателя ЭНЭС -7А:

- Рабочее напряжение, В 24;
- Сопротивление, Ом 6,6;
- Температура переключения, °С 140;
- Габаритные

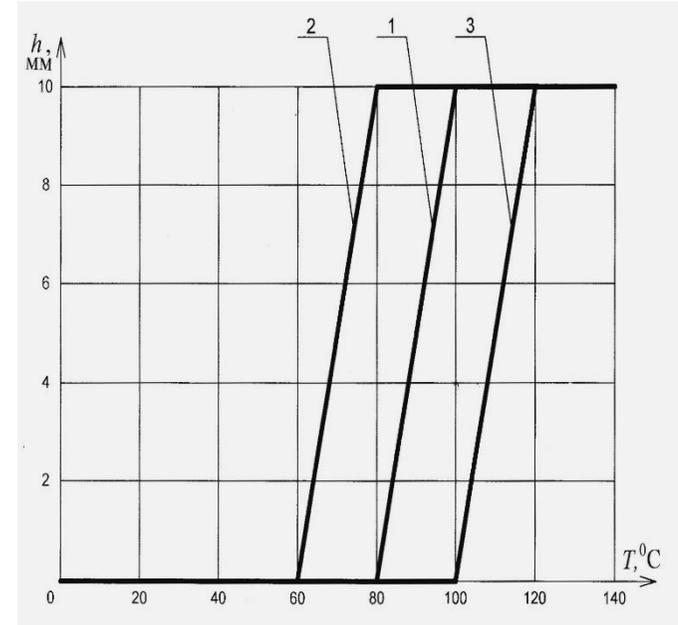


**Макет с ТН, ЭН и МБУ:** 1 – корпус макета, 2 – корпус ЭН и ТН, 3,4 – каналы подачи и отвода жидкости, 5 – БУ, 6 – блок питания

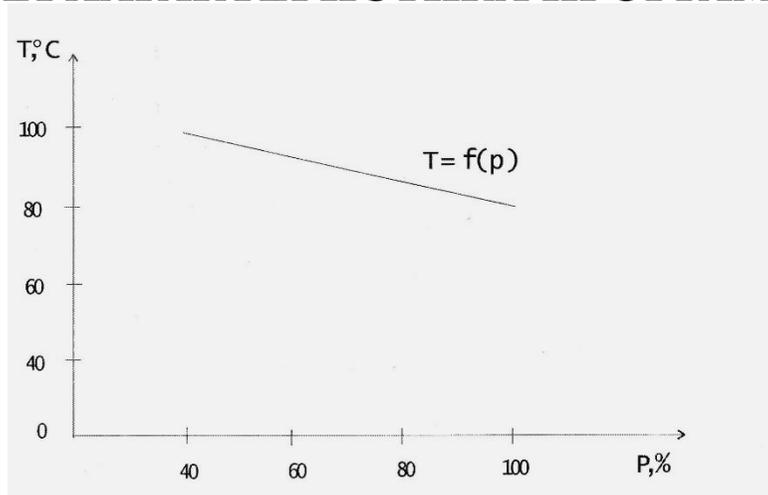
СТАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРГ



СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРГ С ТН И НЭЛ

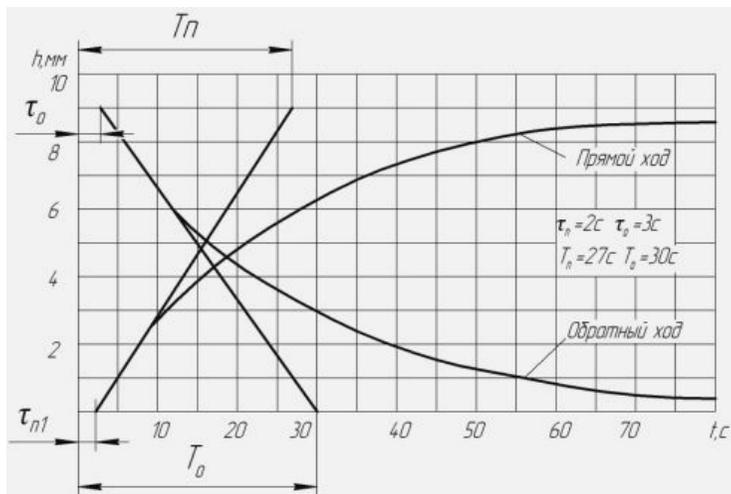


СТАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОГРАММИРУЕМОГО ТРГ

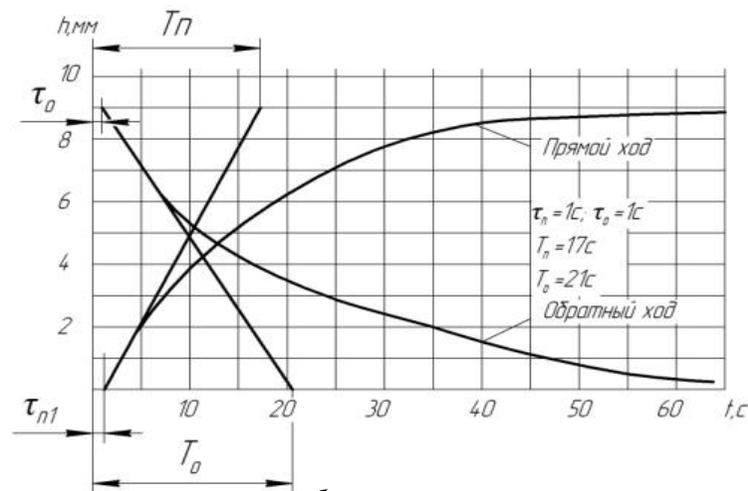


# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ФУНКЦИИ ТРГ

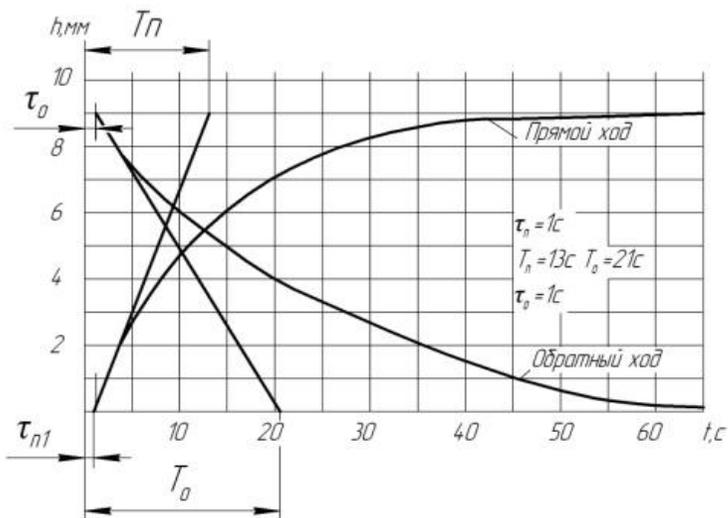
25<sub>1</sub>



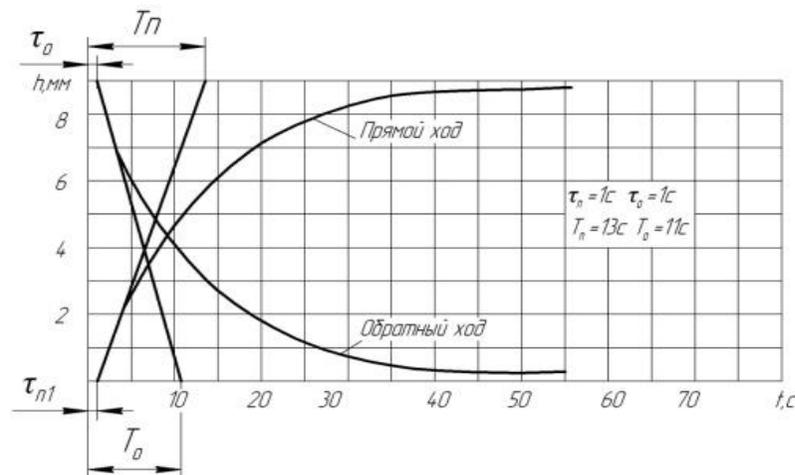
а



б



в

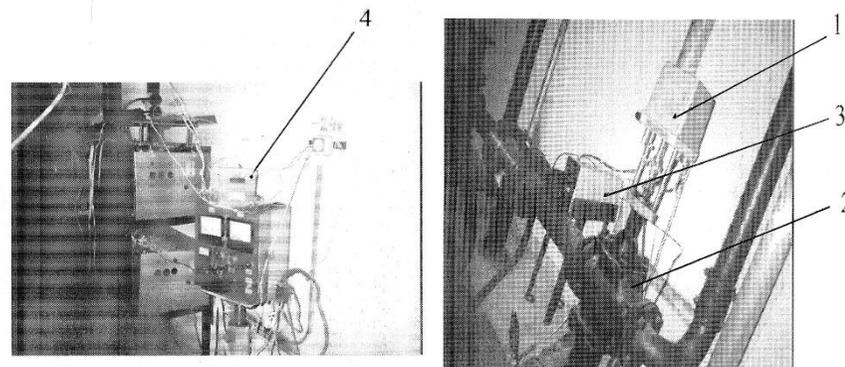
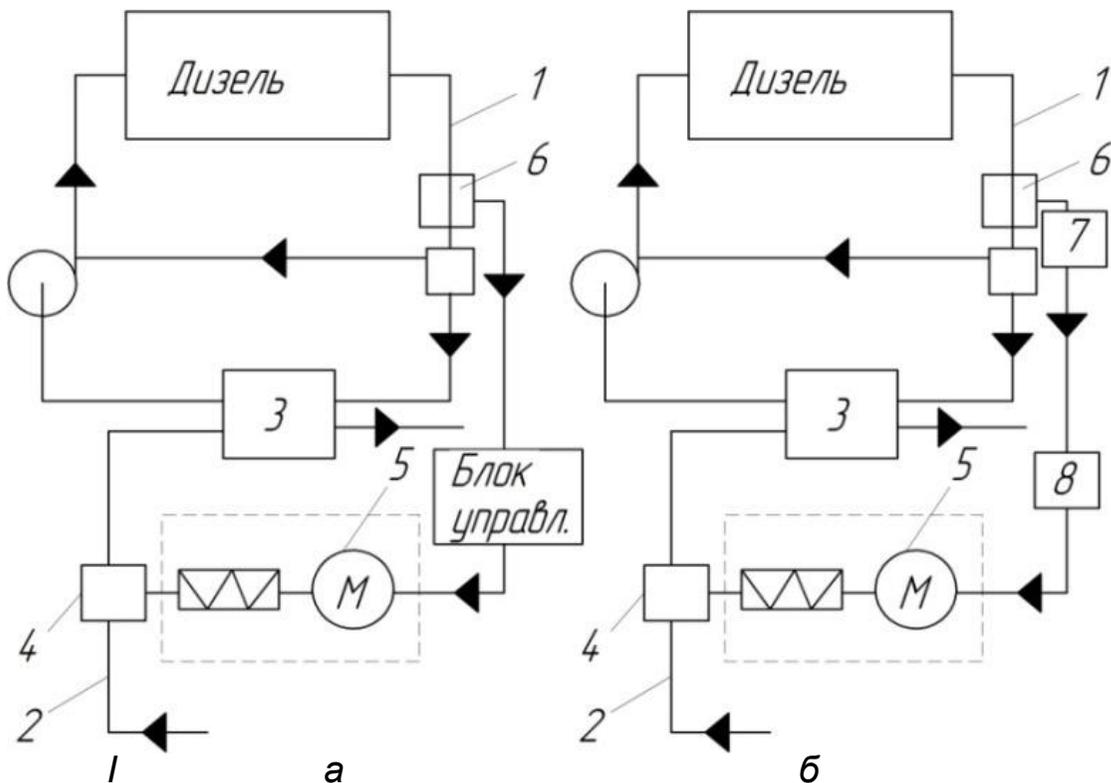


г

а) График переходной функции с твердым наполнителем промышленного термостата; б) График переходной функции с твердым наполнителем и электронагревателем; в) График переходной проводимости с твердым наполнителем и охлаждающей средой; г) График переходной функции с твердым наполнителем, ТМ и охлаждающей средой;

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТ. МТРГ В СО 8ЧН 16,5/18,5

25<sub>2</sub>



II а б



в

I: а – СО дизеля с позиционным ТРГ; б – СО дизеля с МБУ

II. Общий вид экспериментальной СО дизеля 8ЧН 16,5/18,5:

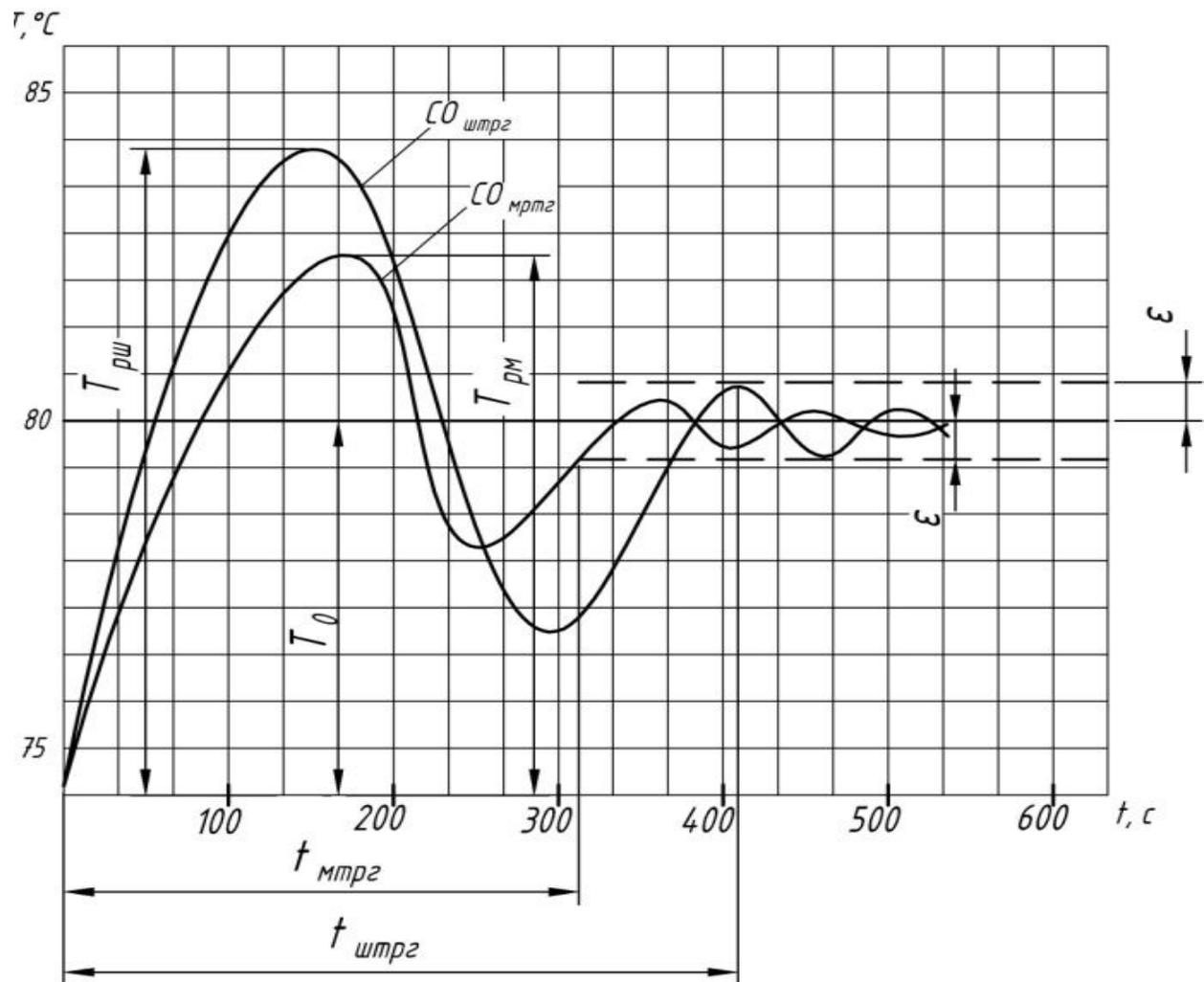
а – 4 – МБУ; б – 1 – ИМ, 2 – РО, 3 – ПБР-3; в – пульт управления

1. Датчик температуры электрического типа ТСМ-50 ГОСТ 6651-78.

2. Исполнительный механизм, типа КТ1:

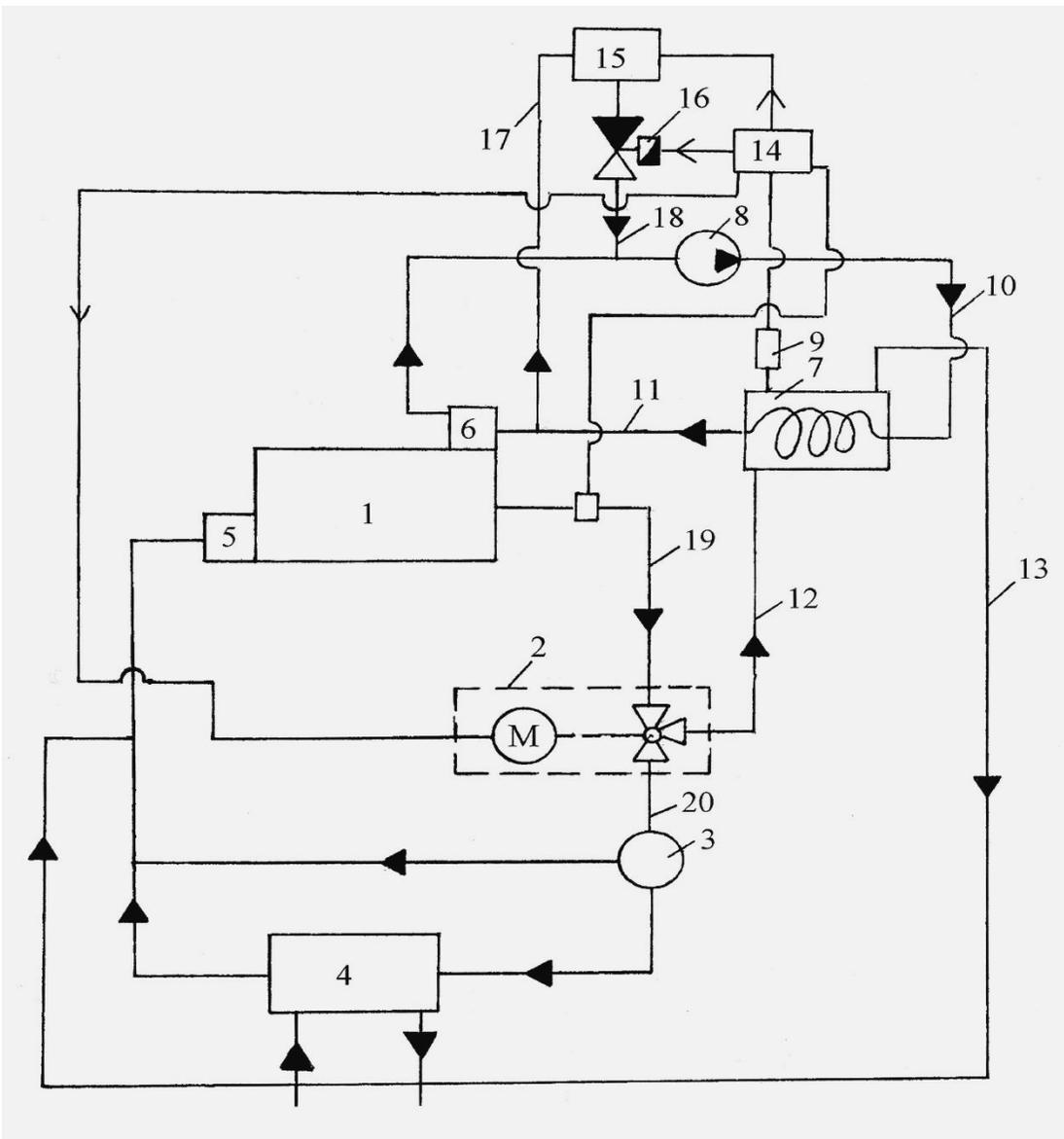
- Номинальное усилие, Н.....6300;
- Скорость управления, мм/мин.....10,16, 25, 40;
- Электродвигатель.....15Вт;
- Номинальное напряжение, В.....220 ± 5%;
- Частота, Гц .....50 ± 2%.

3. Микропроцессорный БУ выполнен на базе однокристалльной микроЭВМ типа К1816.

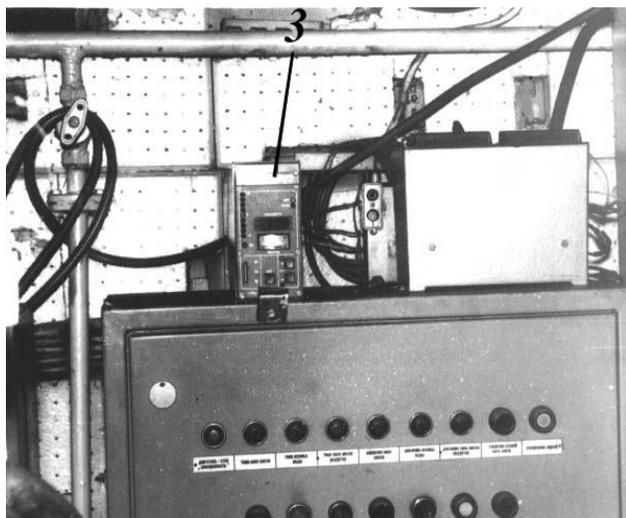
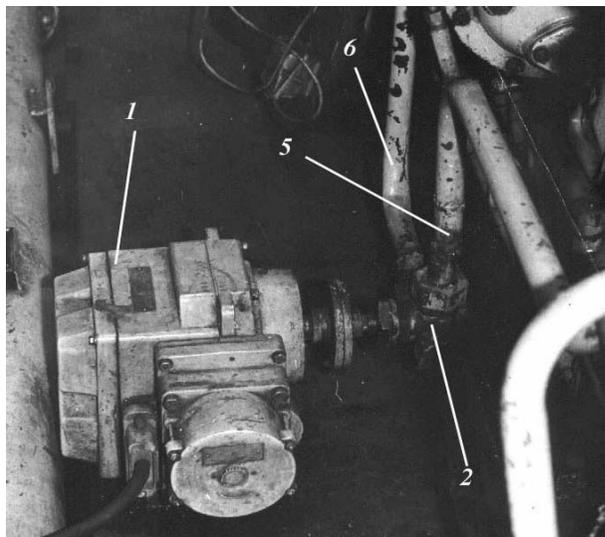


$CO_{штрг}$  – CO со штатным ТРГ;  $CO_{мтрг}$  – CO с микропроцессорным ТРГ

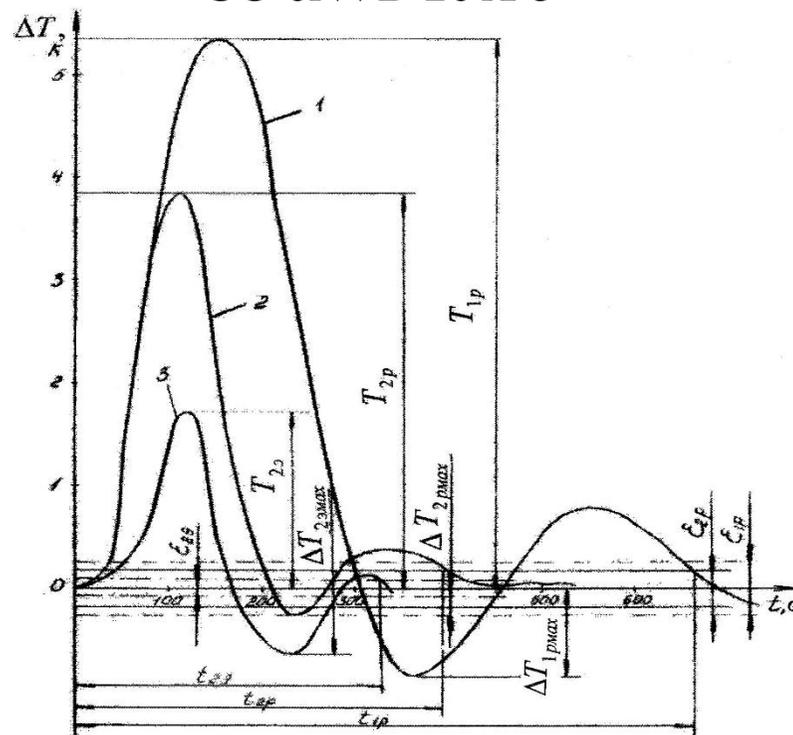
## А-3



- 1 – дизель; 2 – ИМ; 3 – ТРГ;
- 4 – холодильник; 5,8 – насосы;
- 6 – УК КАУ 4,5; 7 – подогреватель;
- 9 – ДТ, 10, 11 – каналы подвода, отвода охлаждающей воды;
- 14 – БУ;
- 15 – вспомогательный котел КОАВ 63;
- 16 – электромагнитный клапан;
- 17, 18 – каналы подвода и отвода утилизационной воды;
- 19, 20 – каналы охлаждающей воды



1 – ИМ «МЭО»; 2 – РО; 3 – электронный блок управления «СУРИ»; 4, 5, 6 – каналы подвода охлаждающей воды из дизеля на РО; на дизель; на холодильник

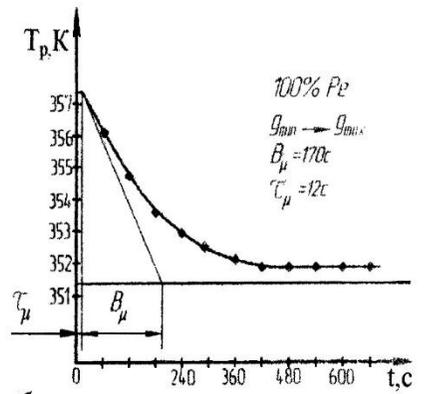
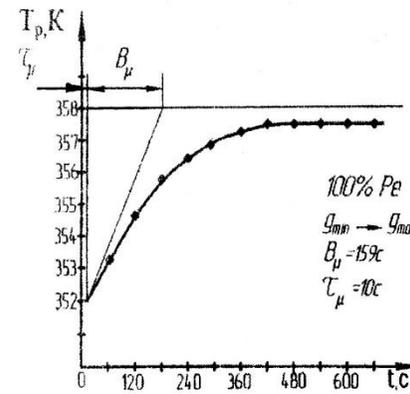
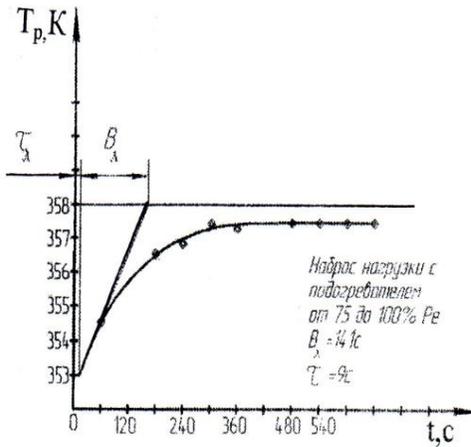
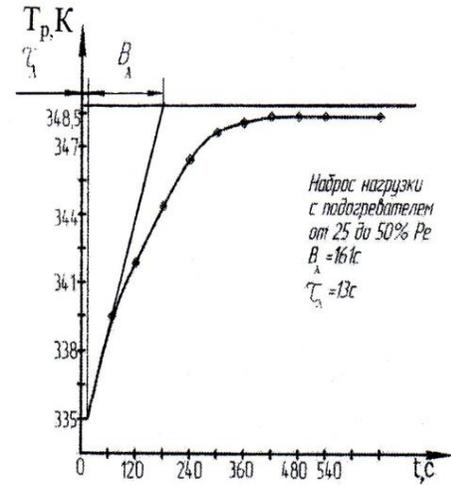
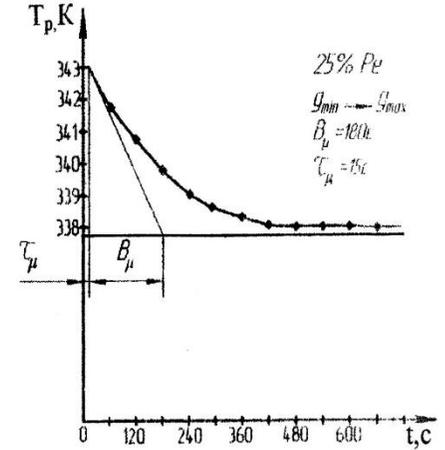
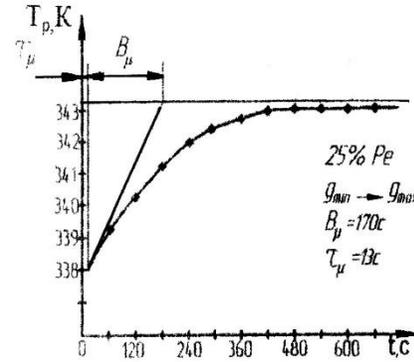
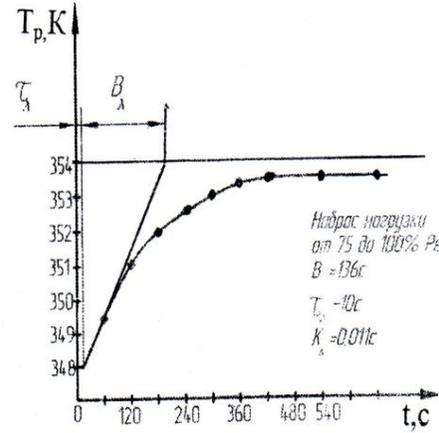
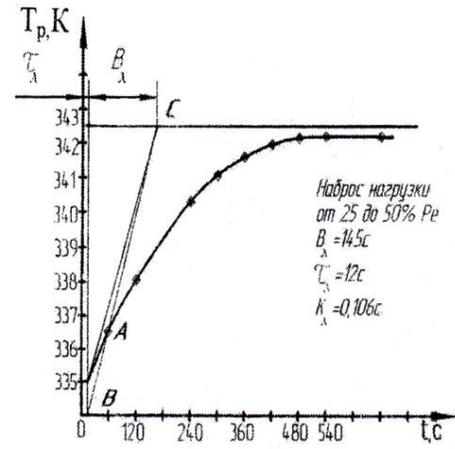


1 – расчетный переходный процесс с ТРГ РТВ 52; 2 – расчетный переходный процесс с электронным ТРГ; 3 – экспериментальный переходный процесс с РИТРГ

Время регулирования по возмущающему воздействию у СО с РИТРГ в 1,3 меньше, чем у системы со штатным ТРГ, а время перерегулирования – на 15 % меньше.

# РАЗГОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПО ВОЗМУЩАЮЩЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

# РАЗГОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПО РЕГУЛИРУЮЩЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ



a

a

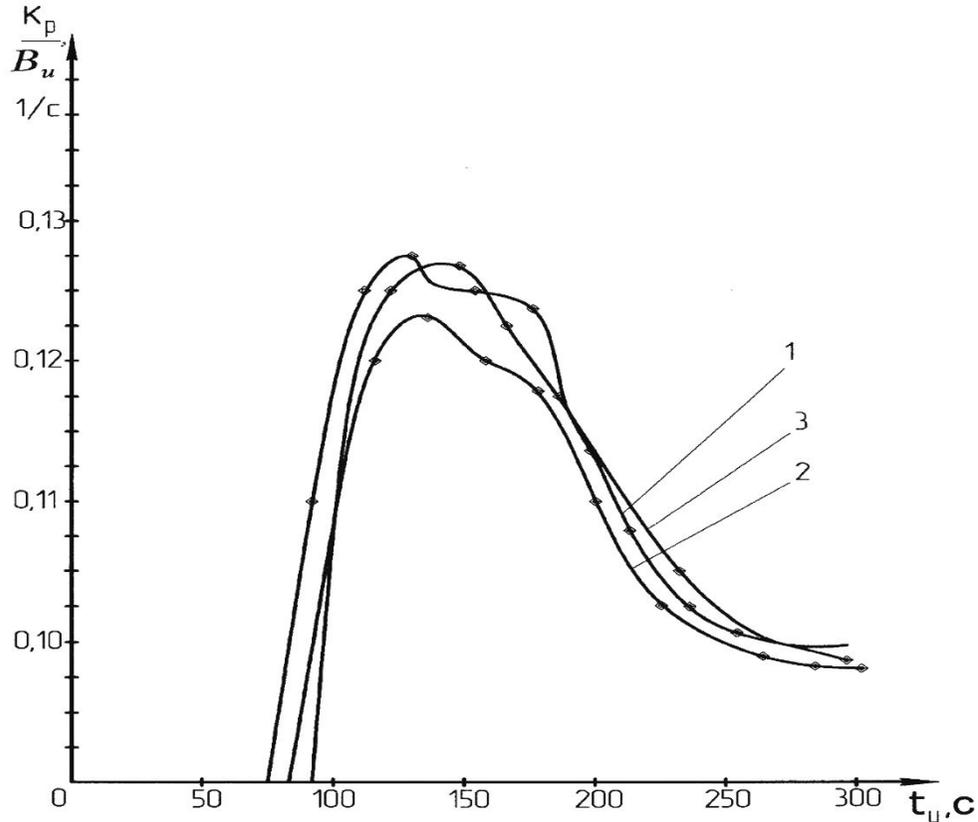
б

б

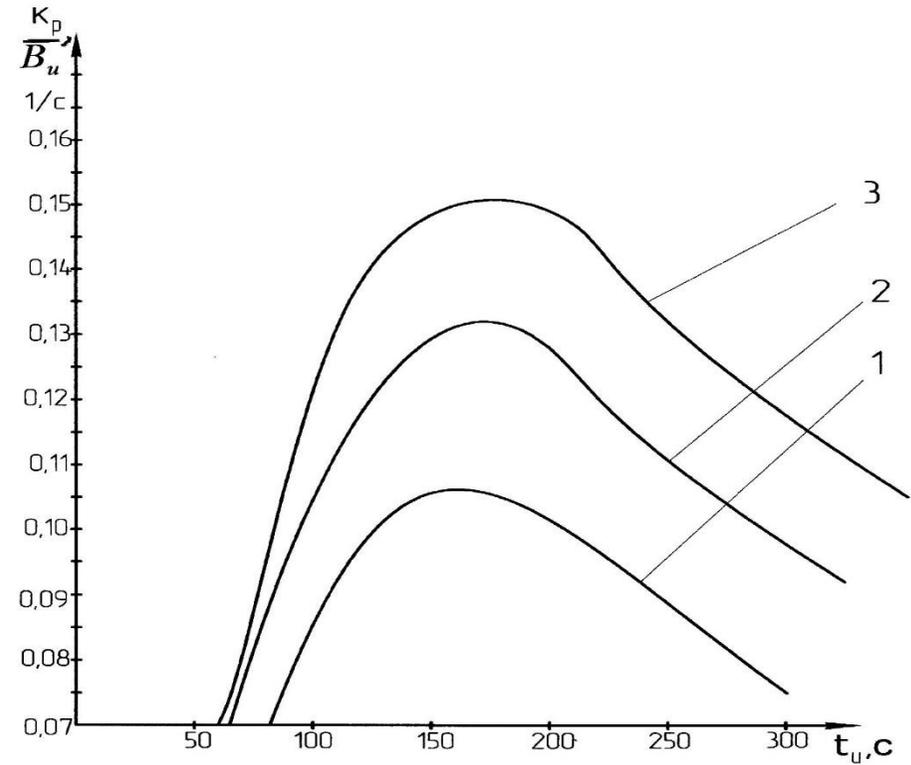
а - с холодильником; б - с подогревателем

а - Pe = 25%; б - Pe = 100%

## ГРАНИЦЫ ОБЛАСТЕЙ ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ

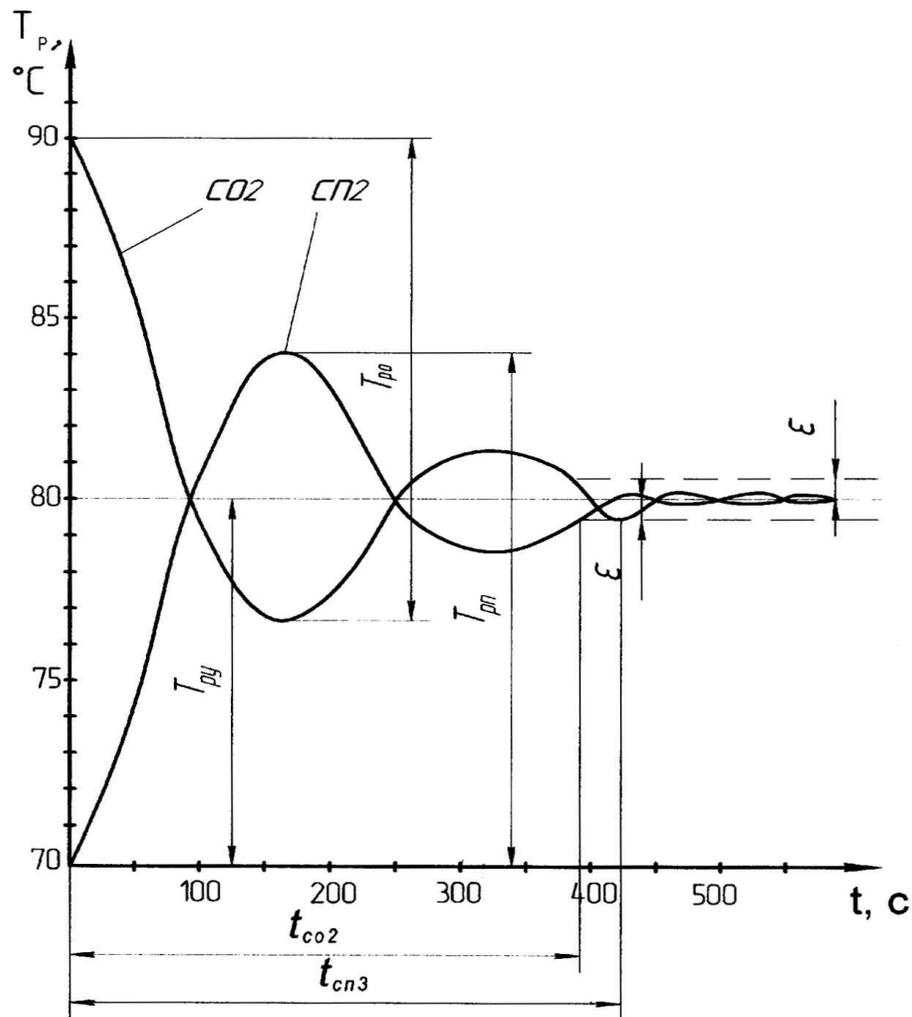


Границы областей запаса устойчивости системы подогрева при различных режимах работы дизеля: 1 – 2 –  $P_e = 50\%$ ; 3 –  $P_e = 25\%$ ;  $n = \text{const}$



Границы областей запаса устойчивости системы охлаждения при различных режимах работы дизеля: 1 – 2 –  $P_e = 50\%$ ; 3 –  $P_e = 25\%$ ;  $n = \text{const}$

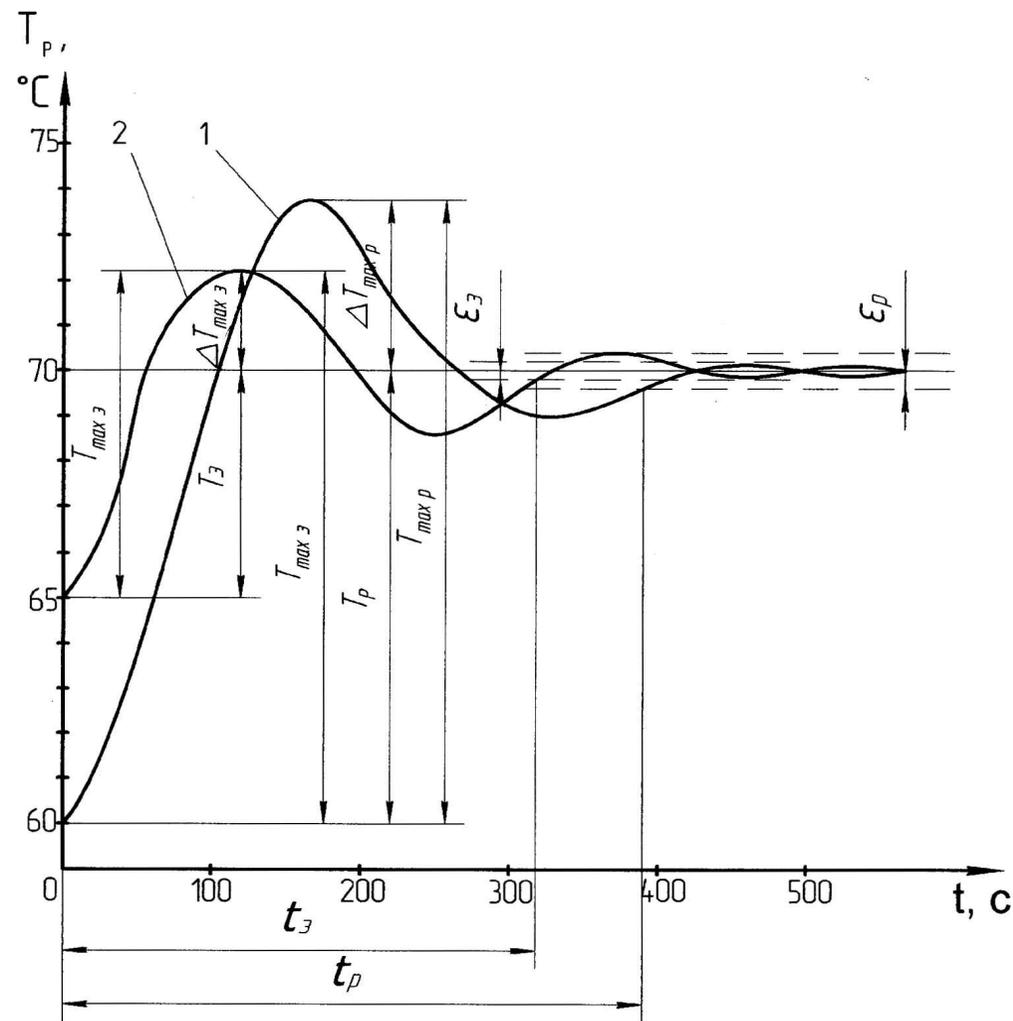
# РАСЧЕТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ СПО ПО ЗАДАЮЩЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ДЛЯ УСРЕДНЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ



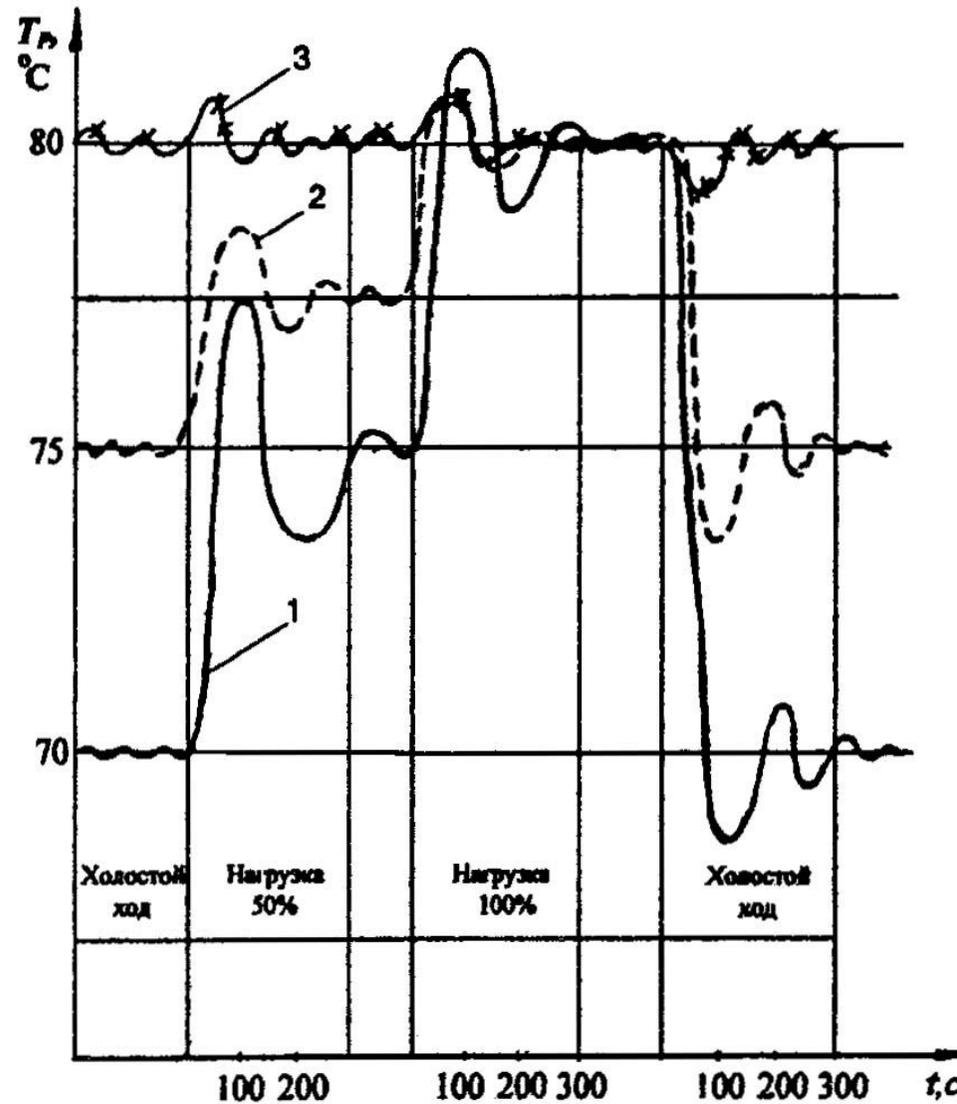
$K_p = 19,25; B_u = 144,1; P_e = 100 \%; n = \text{const};$   
 СП2 – система подогрева;  
 СО2 – система охлаждения

# РАСЧЕТНАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ КРИВЫЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СО

32



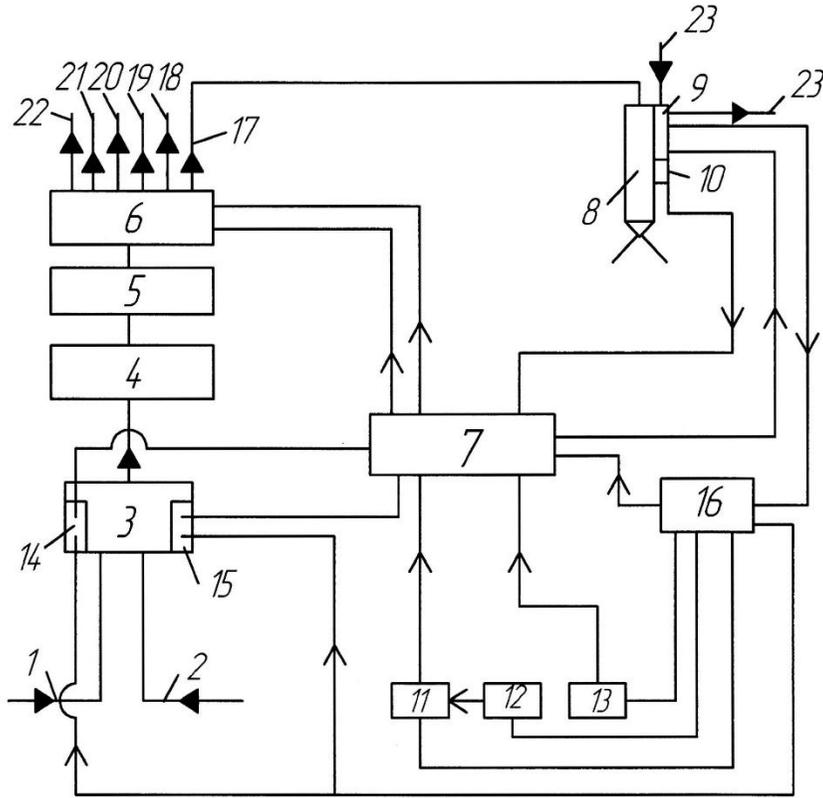
$P_e = 50\%$ , 1 – расчетный переходный процесс;  
 2 – экспериментальный переходный процесс



1 – экспериментальный переходный процесс; 2 – расчетный переходный процесс; 3,4 – переходные процессы системы охлаждения и комбинированной системы с подогревом на холостом ходу

## ТОПЛИВНАЯ СИСТЕМА ДВС С ЭЛЕКТРОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

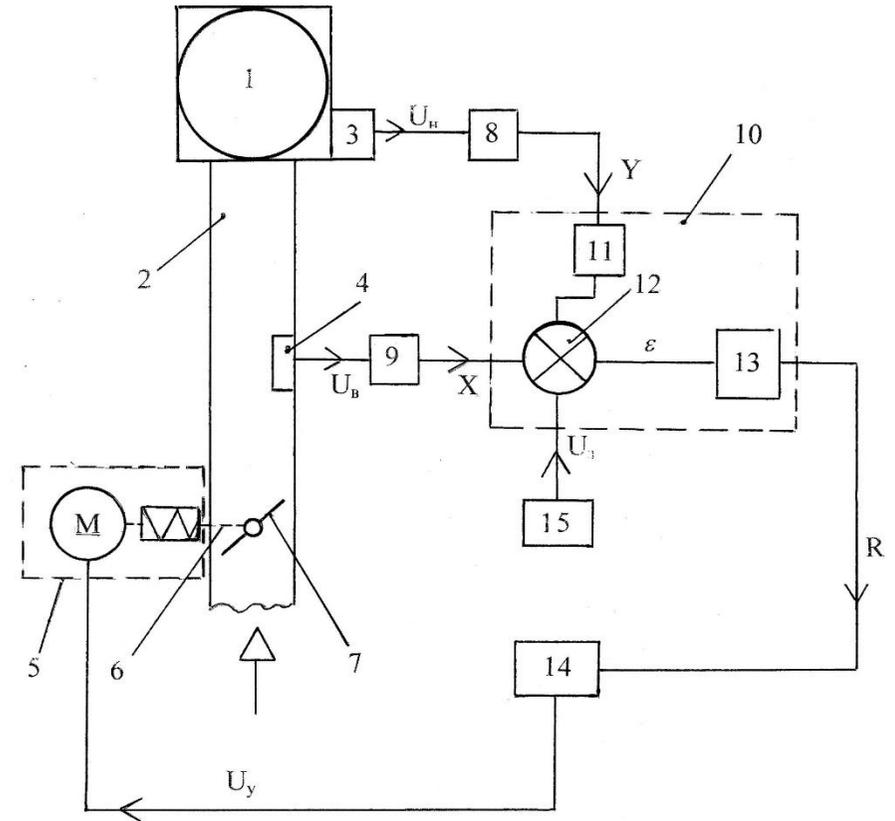
# 34



1 – канал маловязкого топлива; 2 – канал вязкого топлива; 3 – смеситель; 4 – топливный насос высокого давления; 5 – аккумулятор; 6 – электрогидравлический дозатор; 7 – микропроцессорный контроллер; 8 – форсунка; 9 – термоэлектрический охладитель; 10, 11, 12, 13, 14, 15 – датчики температуры форсунки, нагрузки, пульта управления, атмосферного давления, рабочего положения топлив; 16 – блок питания; 17, 18, 19, 20, 21, 22 – каналы подачи топлива в форсунки; 23 – канал СО

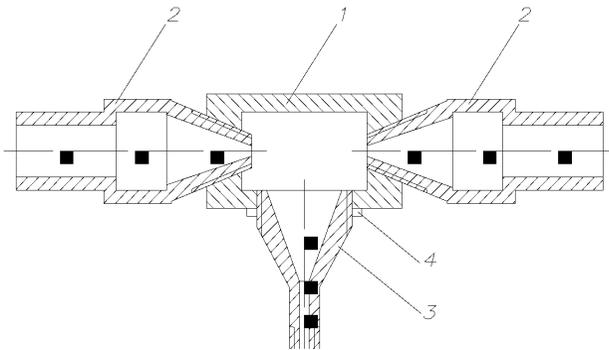
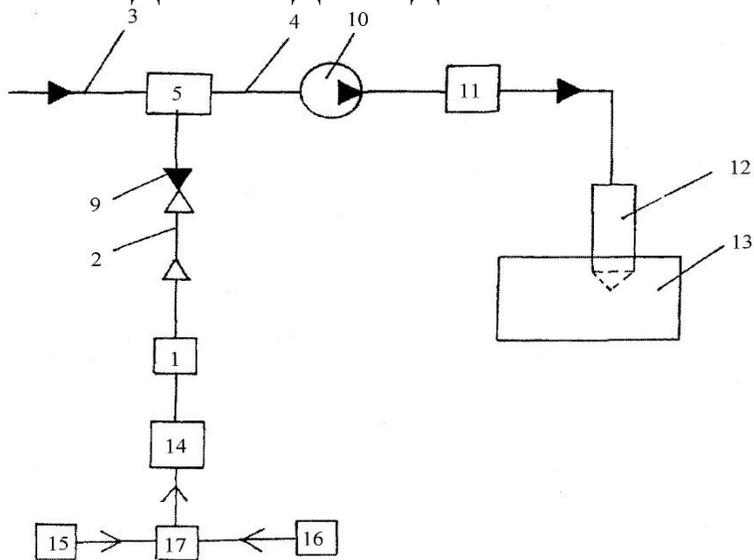
## СХЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА

# 35



1 – дизель; 2 – впускной коллектор; 3 – ДН; 4 – датчик расхода воздуха; 5 – ИМ; 6 – механическая связь; 7 – заслонка; 8, 9 – аналого-цифровые преобразователи; 10 – микро ЭВМ; 11 – компенсирующий узел; 12 – узел сравнения-суммирования; 13 – регулирующий узел; 14 – цифроаналоговый преобразователь; 15 – задатчик программы

## ПРИСАДКА ВОДОРОДА В ТОПЛИВО



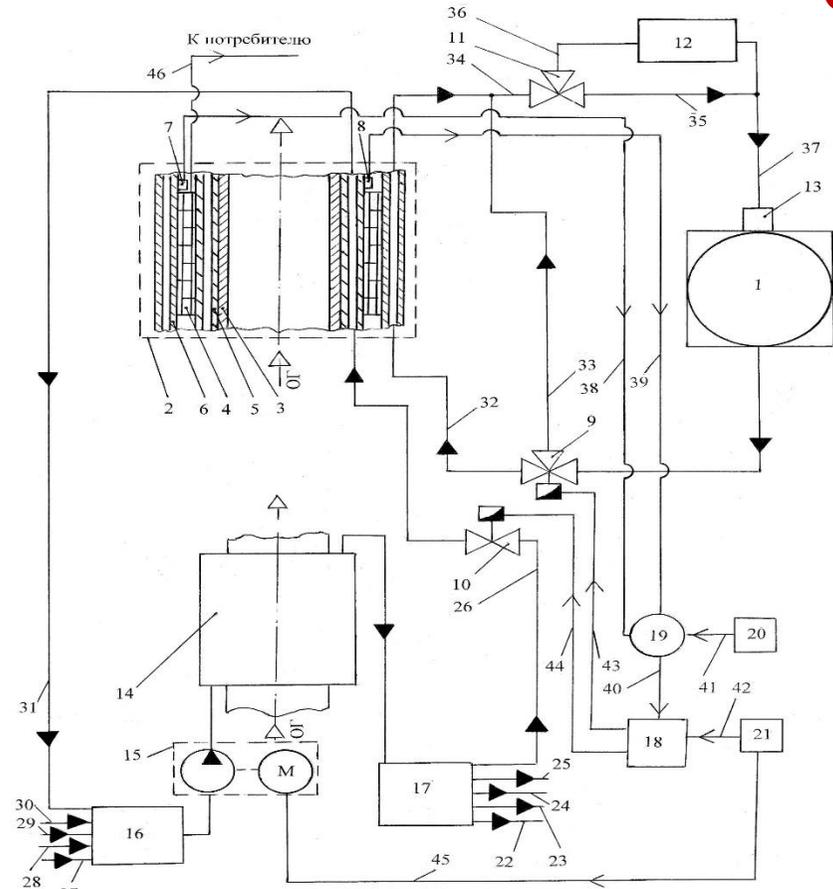
1 – накопительная камера, 2 – канал подачи водорода, 3 – канал подачи топлива, 4 – канал для подачи топлива с водородом, 5 – смешивательная камера, 9 – невозвратный клапан, 10 – топливоподкачивающий насос, 11 – насос высокого давления, 12 – форсунка, 13 – дизель, 14 – электролизер, 15 – датчик нагрузки, 16 – блок питания, 17 – блок управления

Смешивательная камера: 1 – камера; 2, 2<sub>1</sub> – конические топливные патрубки; 3 газовой конический патрубок

# 36

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР

# 37



1 – дизель; 2 – ТЭГ; 3 – выхлопная труба; 4 – ТМ; 5 – теплообменник горячих спаев (ГС); 6 – теплообменник холодных спаев (ХС); 7 – ДТ ХС; 8 – ДТ ГС; 9 – ТРГ; 10 – электронный вентиль; 11 – ТРГ; 12 – холодильник; 13 – насос; 14 – УК; 15 – насос; 16 – сборный бак; 17 – распределительный бак; 18 – БУ; 19 – БС; 20 – задатчик; 21 – блок питания; каналы: 22 – к теплообменникам водяного отопления, 23 – подогревателей воздуха, 24 – топлива, 25 – масла, 26 – регулирования температуры ГС; отработанные каналы: 27 – УК: водяного отопления, 28 – подогревателя воздуха, 29 – топлива, 30 – масла, 31 – ГС; 32 – каналы: подачи охлаждающей жидкости к ХС, 32, 33, 34, 35, 36, 37 – каналы СО; 38, 39, 40, 41, 42 – каналы подачи сигналов; 43, 44, 45, 46 – каналы подачи электроэнергии

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СПО

Параметры передаточной функции СП по нагрузочному каналу

№ п/п	Характеристика воздействия	$K_{\lambda},$ <i>о.е</i>	$T_{\lambda},$ <i>с</i>	$\tau_{\lambda},$ <i>с</i>
1.	Наброс нагрузки от 25 до 50% $P_e$	0,5	161	13
2.	Наброс нагрузки от 50 до 75% $P_e$	0,044	148	11
3.	Наброс нагрузки от 75 до 100% $P_e$	0,046	141	9
4.	Сброс нагрузки от 100 до 75% $P_e$	0,052	141	9
5.	Сброс нагрузки от 75 до 50% $P_e$	0,038	149	11
6.	Сброс нагрузки от 50 до 25% $P_e$	0,12	161	11

Параметры передаточной функции СО по нагрузочному каналу

№ п/п	Характеристика воздействия	$K_{\lambda},$ <i>о.е</i>	$T_{\lambda},$ <i>с</i>	$\tau_{\lambda},$ <i>с</i>
1.	Наброс нагрузки от 25 до 50% $P_e$	0,28	145	12
2.	Наброс нагрузки от 50 до 75% $P_e$	0,051	139	11
3.	Наброс нагрузки от 75 до 100% $P_e$	0,056	136	10
4.	Сброс нагрузки от 100 до 75% $P_e$	0,059	140	10
5.	Сброс нагрузки от 75 до 50% $P_e$	0,057	147	12
6.	Сброс нагрузки от 50 до 25% $P_e$	0,307	157	13

Система подогрева дизеля

№п/п	Характеристика режима дизеля	$K_{p, \text{опт}}$	$T_{\text{из. опт.}}$
1.	100% $P_e, n = \text{const}$	17,9	136,8
2.	100% $P_e, n = \text{const}$	19	144,5
3.	50% $P_e, n = \text{const}$	17,4	140,8
4.	50% $P_e, n = \text{const}$	21,0	148,5
5.	25% $P_e, n = \text{const}$	18,6	146,8
6.	25% $P_e, n = \text{const}$	18,4	154,1

Система охлаждения дизеля

№п/п	Характеристика режима дизеля	$K_{p, \text{опт}}$	$T_{\text{из. опт.}}$
1.	100% $P_e, n = \text{const}$	15,3	145,5
2.	100% $P_e, n = \text{const}$	15,4	137,7
3.	50% $P_e, n = \text{const}$	19,1	145,1
4.	50% $P_e, n = \text{const}$	19,0	140
5.	25% $P_e, n = \text{const}$	23,1	150,5
6.	25% $P_e, n = \text{const}$	24,1	141,7

Проведенные исследования по теме диссертации позволяют сделать следующие выводы:

1. Проведенный анализ влияния теплового состояния на рабочие показатели дизеля позволил определить совокупность параметров охлаждения наиболее существенно влияющих на технико-экономические и экологические показатели судовых дизелей: 1) В САРТ обеспечивается на малых нагрузках несколько повышенная температура регулирования (95-98 °С), а на нагрузках средних и номинальных более низкая (80-85 °С), т.е. отказавшись от широко распространенных статических САРТ с восходящей характеристикой и определенной степенью неравномерности; 2) В системе НВ на нагрузках холостого хода и частичных нагрузок воздух подогревается до 65 °С, на номинальных – охлаждается до 30 °С; 3) Для подачи ОГ в цилиндр предусмотрена «холодная» рециркуляция ОГ; 4) Параметры остальных рабочих систем определяются проектировщиком и регулируются во время эксплуатации.

2. Предложенная концепция построения САРТС судовых дизелей, позволяет решить задачу максимального быстродействия в САРТ судового дизеля и определить методы ее реализации.

3. Модернизированы СО, СС, НВ и аварийной остановки дизеля с целью обеспечения квазиоптимального теплового состояния дизельной установки и требуемого температурного значения основных деталей ЦПГ при переменных нагрузках работы дизеля. Разработанная многоконтурная система автоматического регулирования всех температурных параметров в СО, НВ, СС представляет собой, как пример сложного рационального решения для систем комплексной автоматизации.

4. Разработана принципиальная схема АБПТ в режиме получения холода утилизацией ОГ и решены методы использования полученного хладоносителя в рабочих системах для автоматического регулирования теплового состояния судовых ДВС.

5. Разработаны, испытаны в условиях эксплуатации на дизельных установках электрические ТРГ и выполнен их сравнительный анализ. Предложенный оригинальный ТРГ прямого действия с встроенным в его ТН особым устройством «нагревательно-охлаждающим» блоком, работающим по принципу Пельтье дает возможность вводить в СО дополнительный импульс по нагрузке или по температуре забортной воды обеспечивая тем самым высокое качество переходного процесса (комбинированная система) и значительное уменьшение общей зоны неравномерности. РИТРГ и МТРГ подтвердили свои положительные характеристики во время выполнения экспериментального исследования. Причем относительно последнего следует отметить его предназначение для использования в современных САРТ, являющихся частью комплексных систем автоматизации судна, построенный на широкой компьютеризации процессов управления двигателем.

6. Проведены экспериментальные исследования СПО с РИТРГ на судовом дизеле 6NVD 26 A-3 и МТРГ на стендовом дизеле 8ЧН 16,5/18,5. В результате выполнения в СПО экспериментов на судовом дизеле 6NVD 26 A-3 получена оценка режимов работы дизеля на параметры передаточных функций СПО, определены параметры настройки РИТРГ и выполнен сравнительный анализ качества регулирования СПО. Разработанная СПО обеспечивает ускоренный прогрев при пуске дизеля за счет автоматического подключения специального подогревателя, использующего горячую воду от УК и ВК, при этом увеличивается быстродействие и качество регулирования. МТРГ позволяет обеспечить реализацию сравнительно сложных алгоритмов на одной и той же аппаратуре с учетом большого числа параметров, характеризующих работу дизеля.

7. Внедрение полученных методов и средств АРТС, судовых ДВС будет способствовать получению значительного экономического эффекта и формированию комплексных систем автоматизации судов Водного транспорта.

В результате экономических расчетов установлено, что в случае использования данной работы на т/х «Волгарь-7» на одном судовом дизеле 6NVD 26 A-3, удастся в течение года сэкономить 19 тонн топлива. На холостом ходу и частичных нагрузках экономия топлива составила 15%. Таким образом, поставленные задачи исследования решены, а его цель достигнута.