

**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:

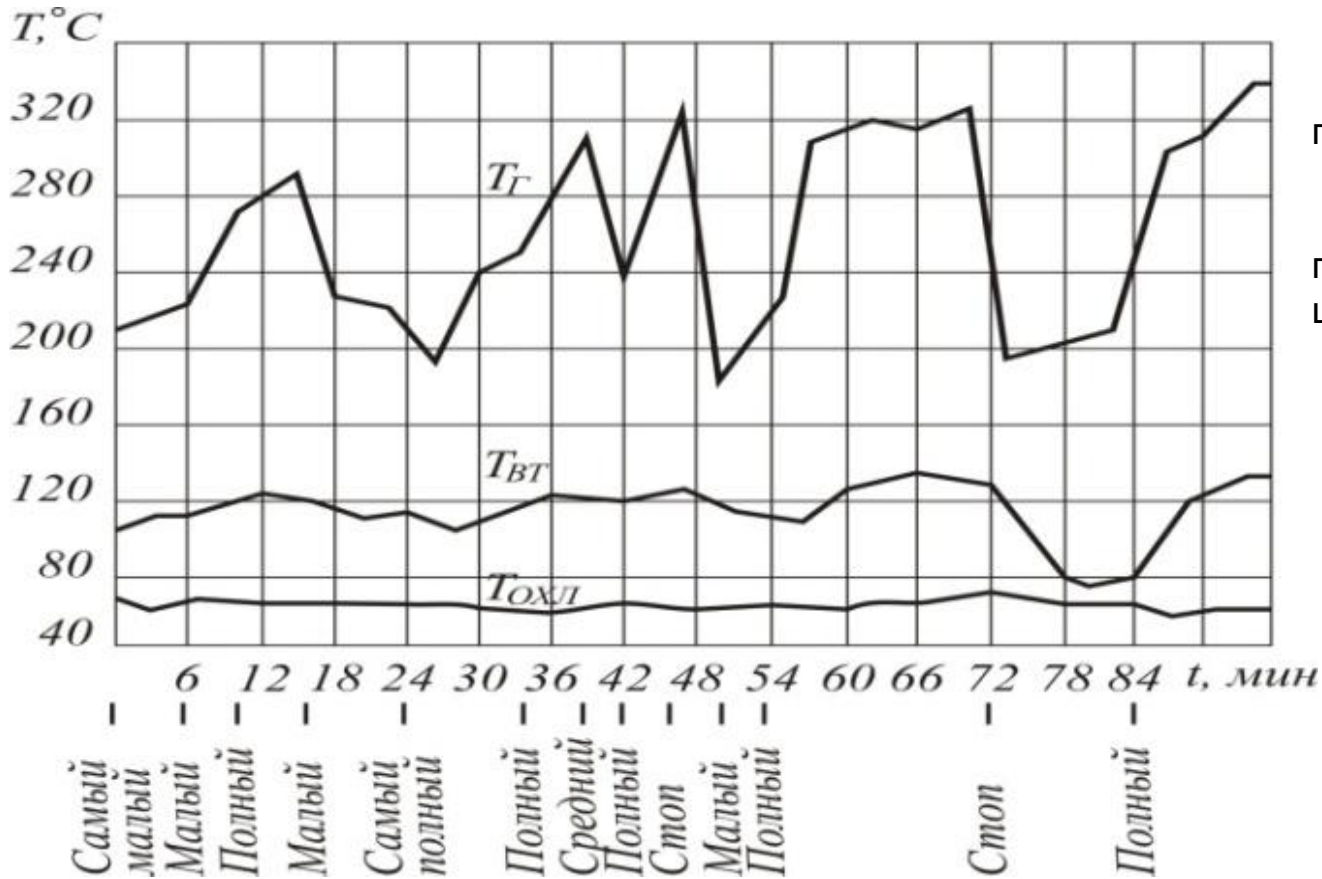
1. Провести анализ влияния температурного состояния на рабочие показатели дизеля и определить совокупность параметров охлаждения наиболее существенно влияющих на технико-экономические и экологические показатели судовых дизелей.
2. Разработать научную концепцию построения системы автоматического регулирования 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:

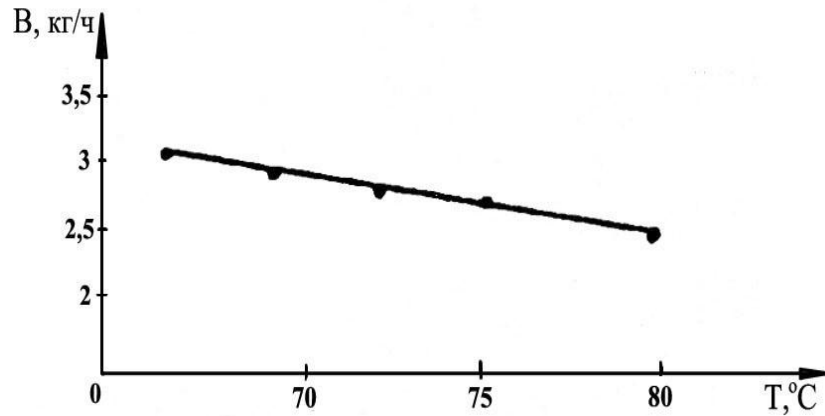
T_g , T_{BT} , $T_{охл}$ – температуры выпускных газов; втулки цилиндра; охлаждающей цилиндр воды

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

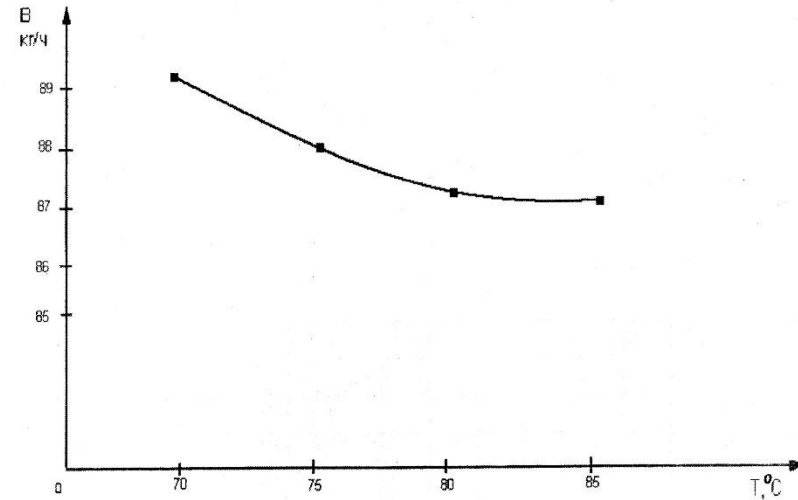
ВЫБОР ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ СО И ДЕТАЛЕЙ ЦПГ СДВС

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		

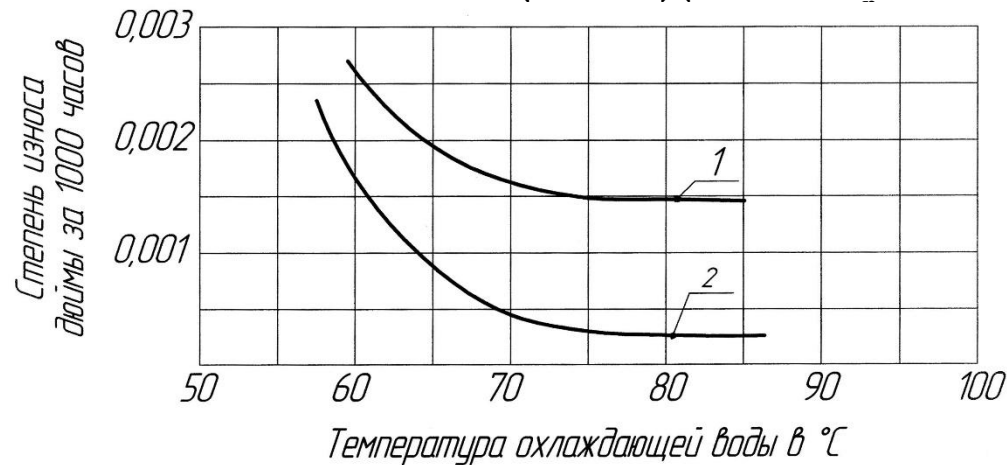
РАСХОД ТОПЛИВА ОТ T_{CO} СО
8ЧН 16,5/ 18,5 НА РЕЖИМАХ
ХОЛОСТОГО ХОДА, $n = 618 \text{ мин}^{-1}$



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



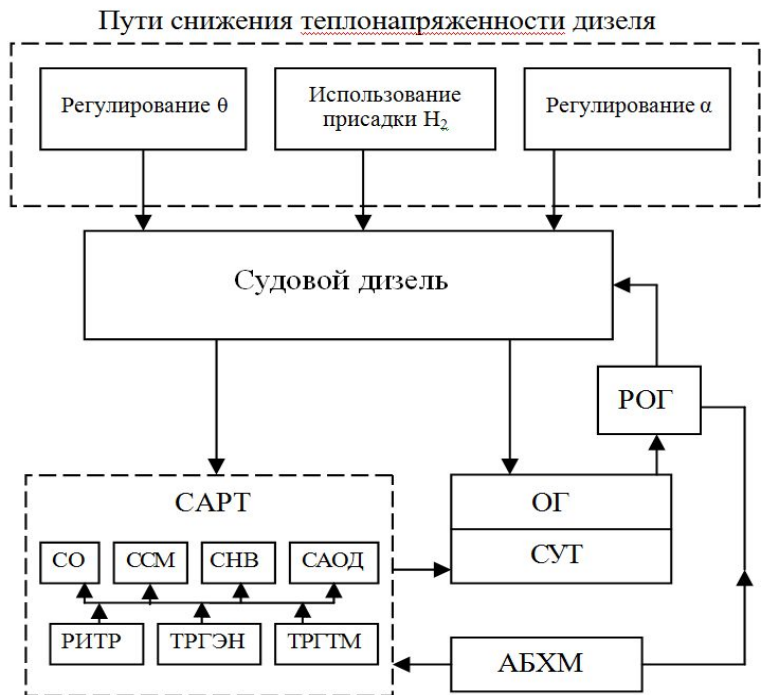
ЗАВИСИМОСТЬ ИЗНОСА ЦИЛИНДРА ОТ $T_{\text{ОХЛ. ВОДЫ}}$



1 – девять двухтактных дизелей; 2 – девять четырехтактных дизелей

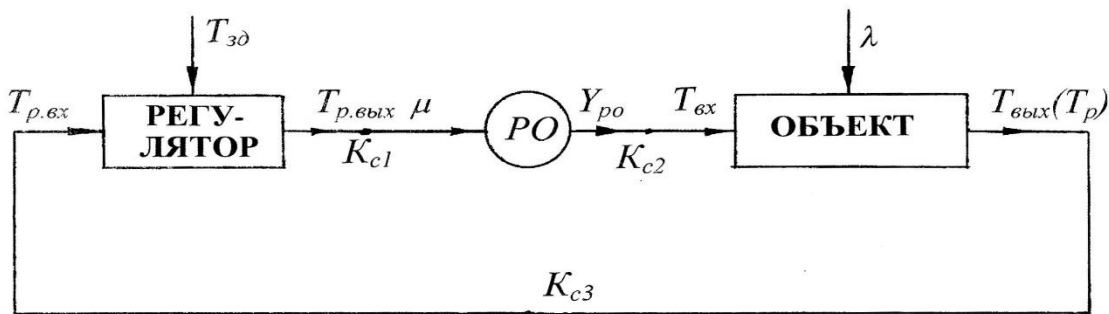
СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ИССЛЕДОВАНИЙ

6₁



θ – угол опережения впрыскивания топлива;
 H_2 – водород в виде присадки; α – 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



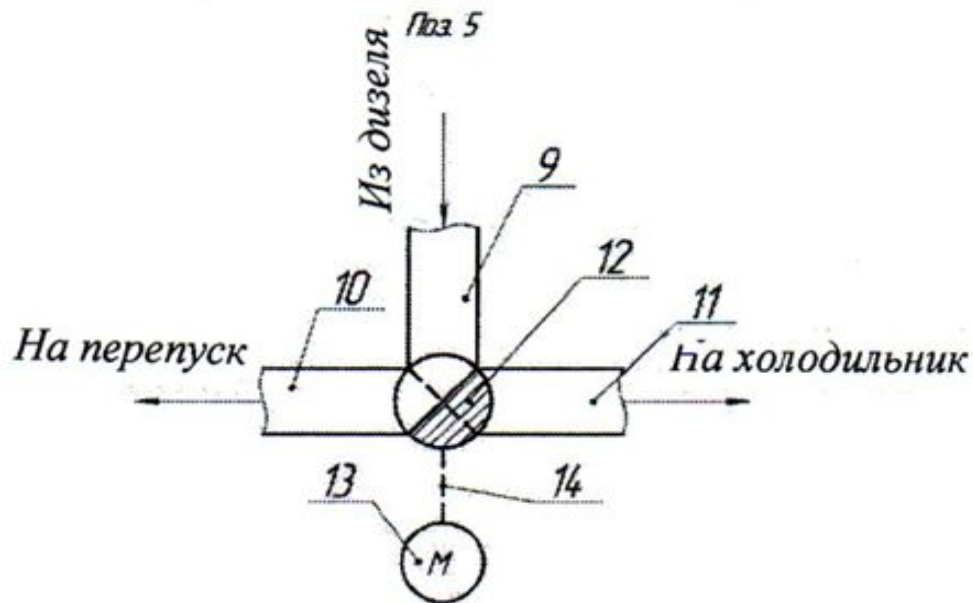
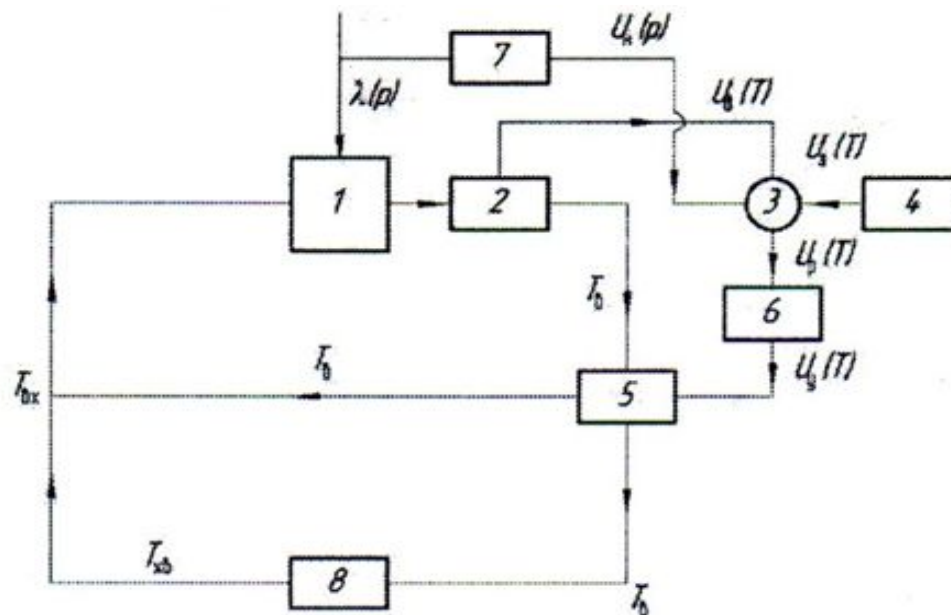
Объект характеризуется: $T_{вх}, T_{вых}(T_p), \lambda$.
 ТРГ характеризуется координатами: $T_{p,вх}, T_{p,вых}, T_{зд}$.
 K_{c1}, K_{c2}, K_{c3} – передаточные коэффициенты связей.
 $\bar{\lambda} = (\lambda_1, \dots, \lambda_1) \quad \bar{\mu} = (\mu_1, \dots, \mu_r)$
 $|\mu_1| \leq U_1, \dots, |\mu_r| \leq U_r$, 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

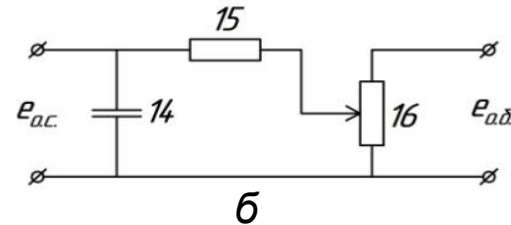
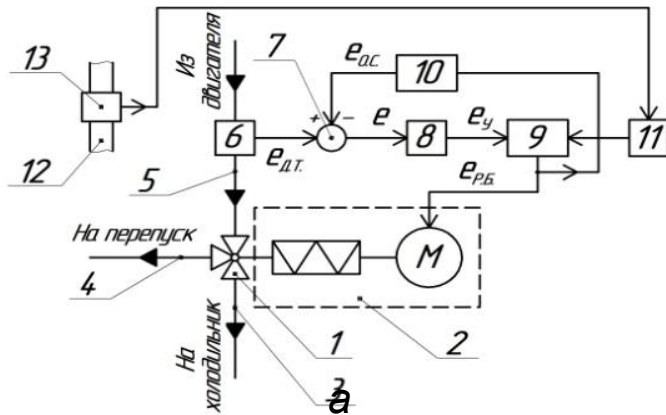
6₂

- 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

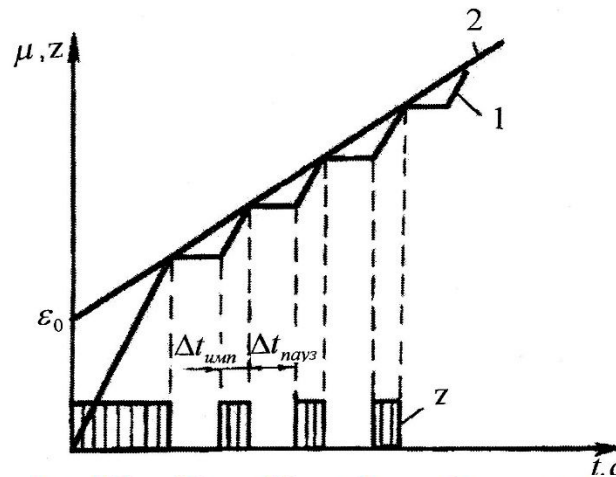
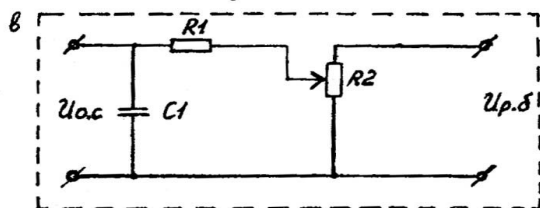
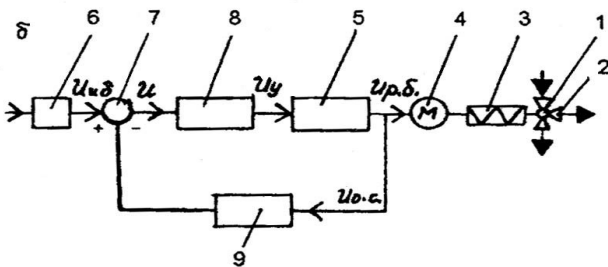
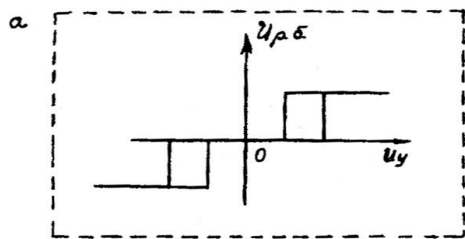


ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА РИТРГ (Патент № 2031216)

7,
1



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:

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

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

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

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

$$d\mu / dt = S = \text{tg}\alpha$$

Средняя скорость перемещения РО составит

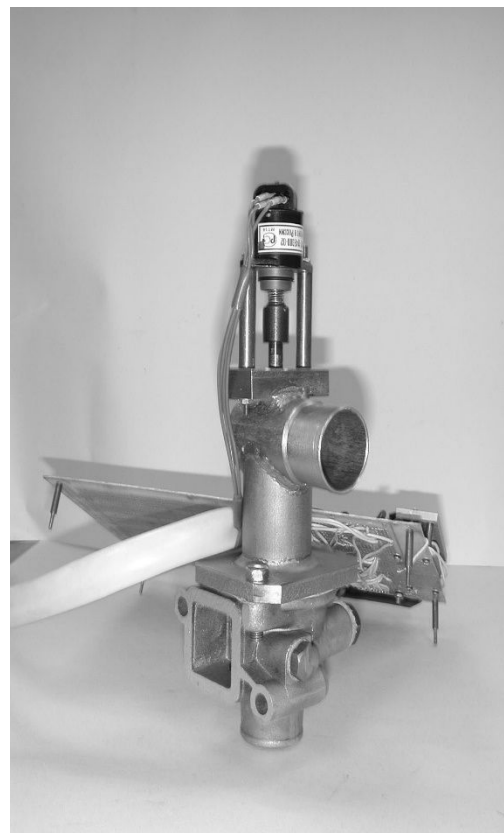
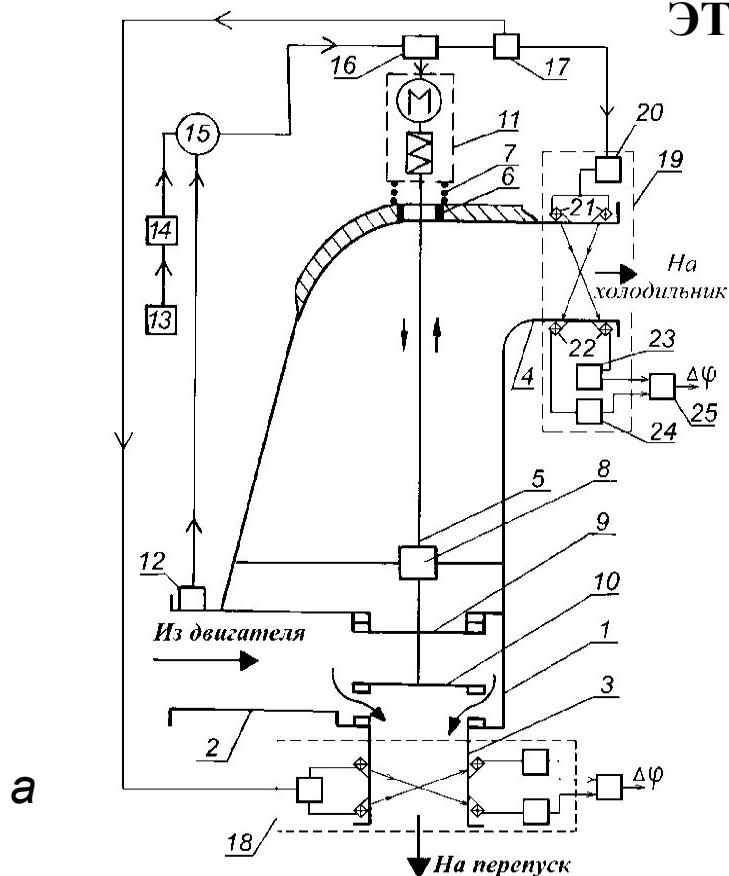
$$d\bar{\mu} / dt = \text{tg}\beta = \Delta t_{\text{имп}} s / T, \text{ или } d\bar{\mu} / dt = \gamma s. \quad |W_{\text{и.м}}(s) = \bar{M}(s) / \Gamma(s) = s / p.$$

I

II

ЭТРГ С СЕРВОДВИГАТЕЛЕМ (Патент №2256805)

7₂

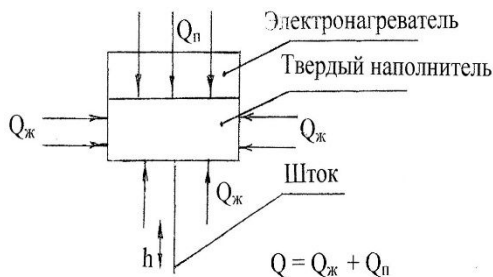


1 – корпус; 2, 3, 4 – патрубки; 5 – шток; 6 – элемент уплотнительный; 7 – пружина; 8 – втулка направляющая; 9 – клапан основной; 10 – клапан дополнительный; 11 – электрический ИМ; 12, 13 – ДТ и ДН; 14 – задатчик; 15 – БС; 16 – БУ; 17 – блок включения; 18, 19 – ультразвуковые приборы; 20 – генератор;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

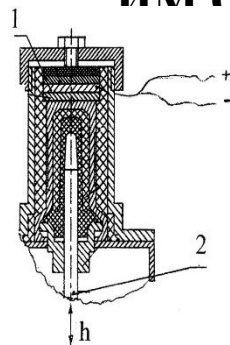
В ультразвуковых приборах 18, 19 используется фазовый расходомер 25., На частичных нагрузках, клапан 9 должен быть закрыт, следовательно, разность фаз $\Delta\varphi = 0$, т.е. охлаждающая жидкость не пропускается через исправный клапан 9. Если $\Delta\varphi > 0$, то клапан 9 неисправен. При $\Delta\varphi \geq [\Delta\varphi_{\text{доп}}]$, 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)

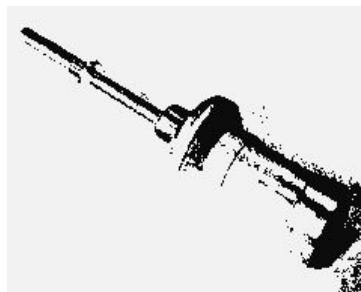
8



a



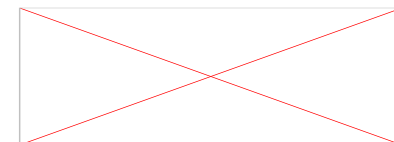
б



в

a – 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_{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

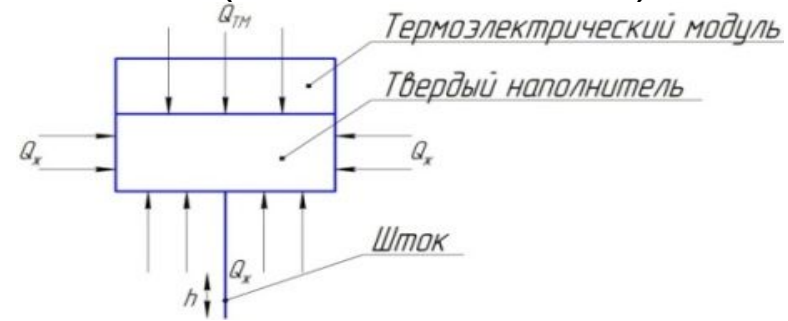
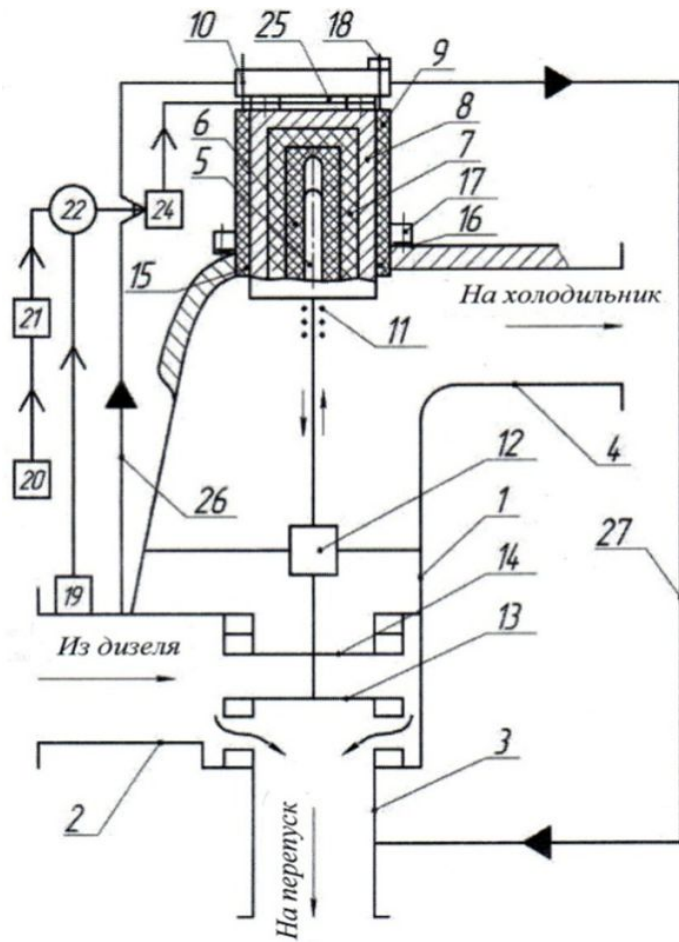
a - структурная схема; **б** - функциональная схема; **в** - пространственное изображение; 1- корпус; 2, 3, 4 – патрубки; 5 – шток удлиненный; 6 – втулка резиновая; 7 – ТН; 8 – баллон латунный; 9 – цилиндр теплоизоляционный; 10 – теплообменник; 11 – пружина; 12 – втулка направляющая; 13 – клапан дополнительный; 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

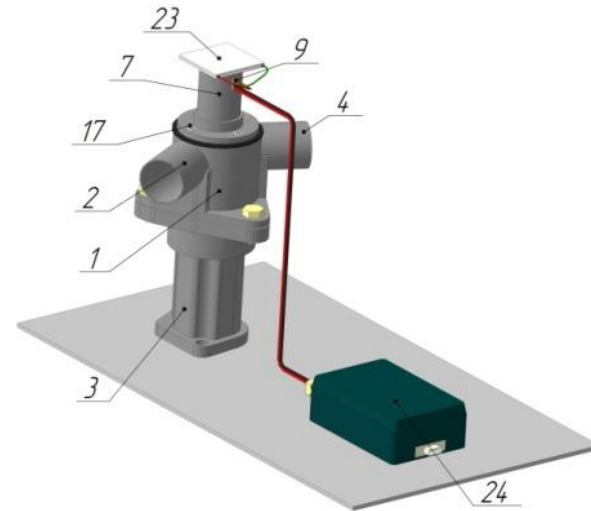
$$y_p = W_D(s)W_y(s)W_{ИМ}(s)K_{c2}K_{c3}T_p$$

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

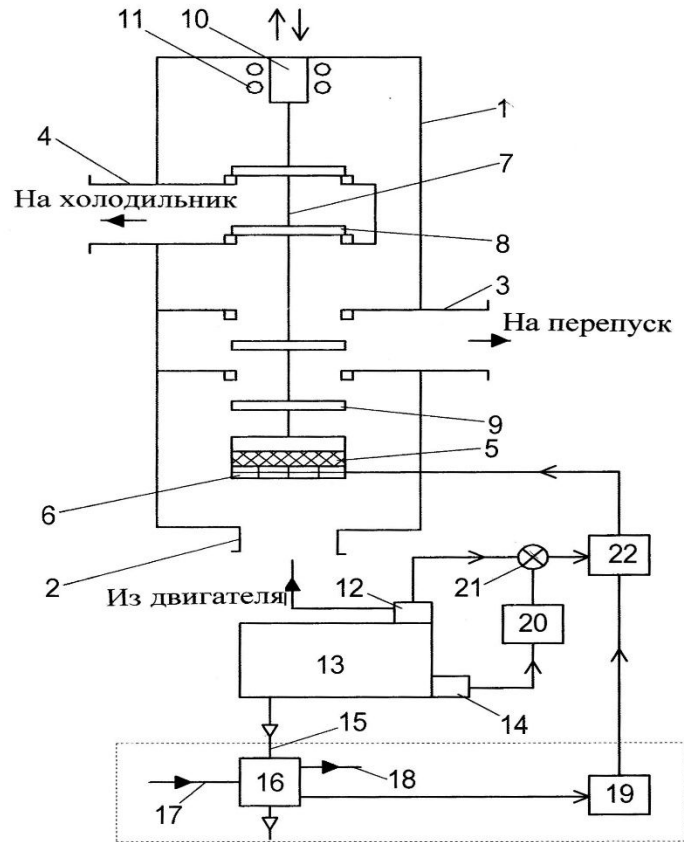
$$y_p = W_D(s)W_y(s)W_{ИМ}(s)K_{c2}K_{c3}T_p \text{ или } y_p = W_p(s)T_p$$

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)

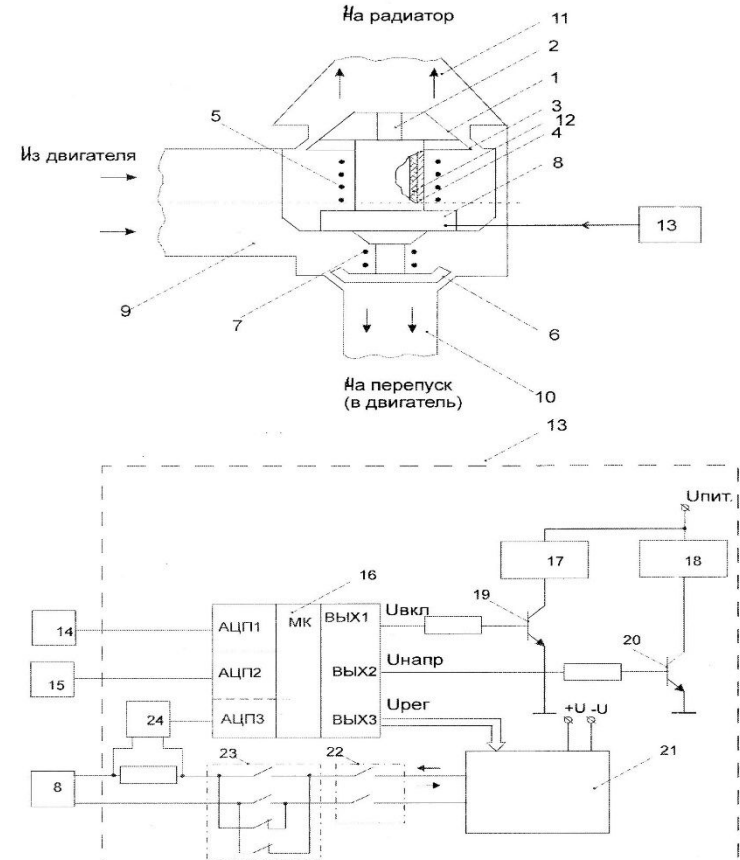
10₂



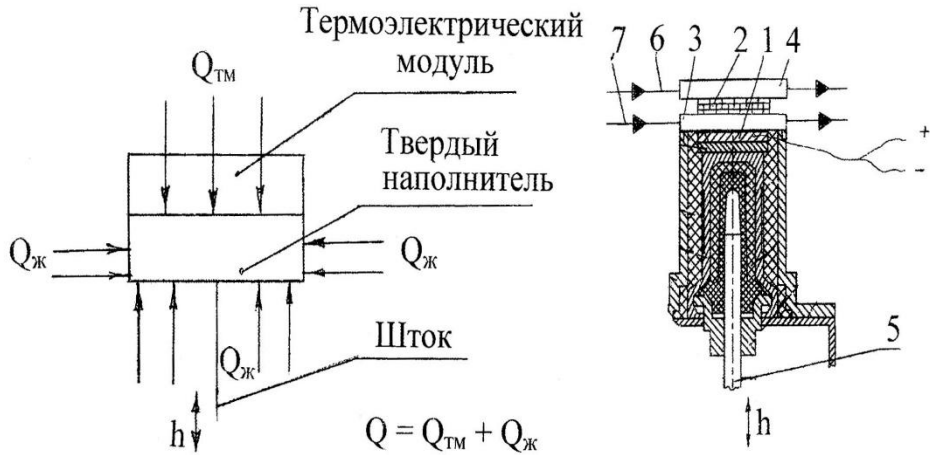
1 – корпус; 2, 3, 4 – патрубки; 5 – ТН; 6 – ТМ;
7 – шток; 8, 9 – клапаны; 10 – направляющая втулка;
11 – пружина; 12, 14 – ДТ, ДН;
13 – двигатель; 15 – канал выхлопной трубы;
16 – термоэлектрический генератор;
17; 18 – каналы охлаждающей жидкости;
19 – блок питания; 20 – датчик; 21 – БС; 22 – БУ

ПРОГРАММИРУЕМЫЙ ТРГ С ТМ (Патент № 2256805)

10₃

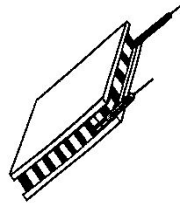


1 – корпус ТРГ; 9, 10, 11 – патрубки; 2 – шток;
3 – клапан основной; 4 – баллон; 5, 7 – пружина;
6 – клапан перепускной; 8 – ТМ; 12 – ТН;
13 – программируемый БУ; 14, 15 – ДТ, ДН;
16 – микроконтроллер; 17, 18 – реле; 19, 20 – ключи;
21 – регулятор источника тока; 22 – контакты
включения и выключения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



а

б



в

а – структурная схема;

б – конструктивная схема:

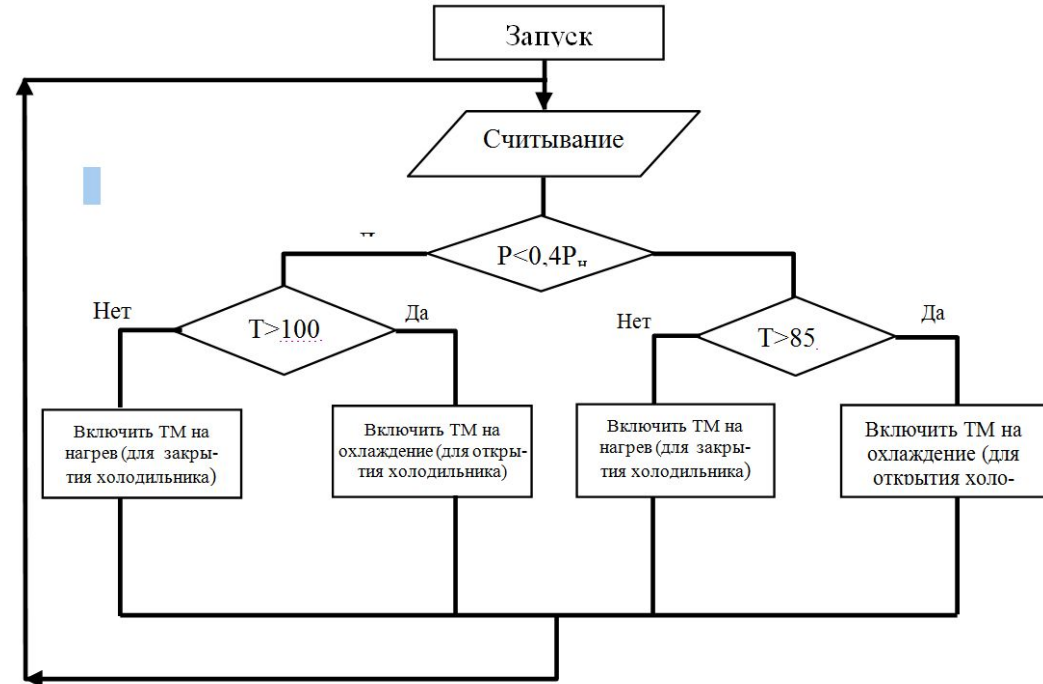
1 – ТН; 2 – ТМ;

3,4 – теплообменники;

5 – шток;

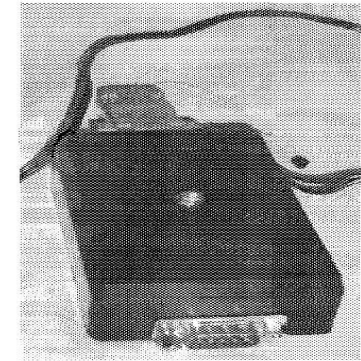
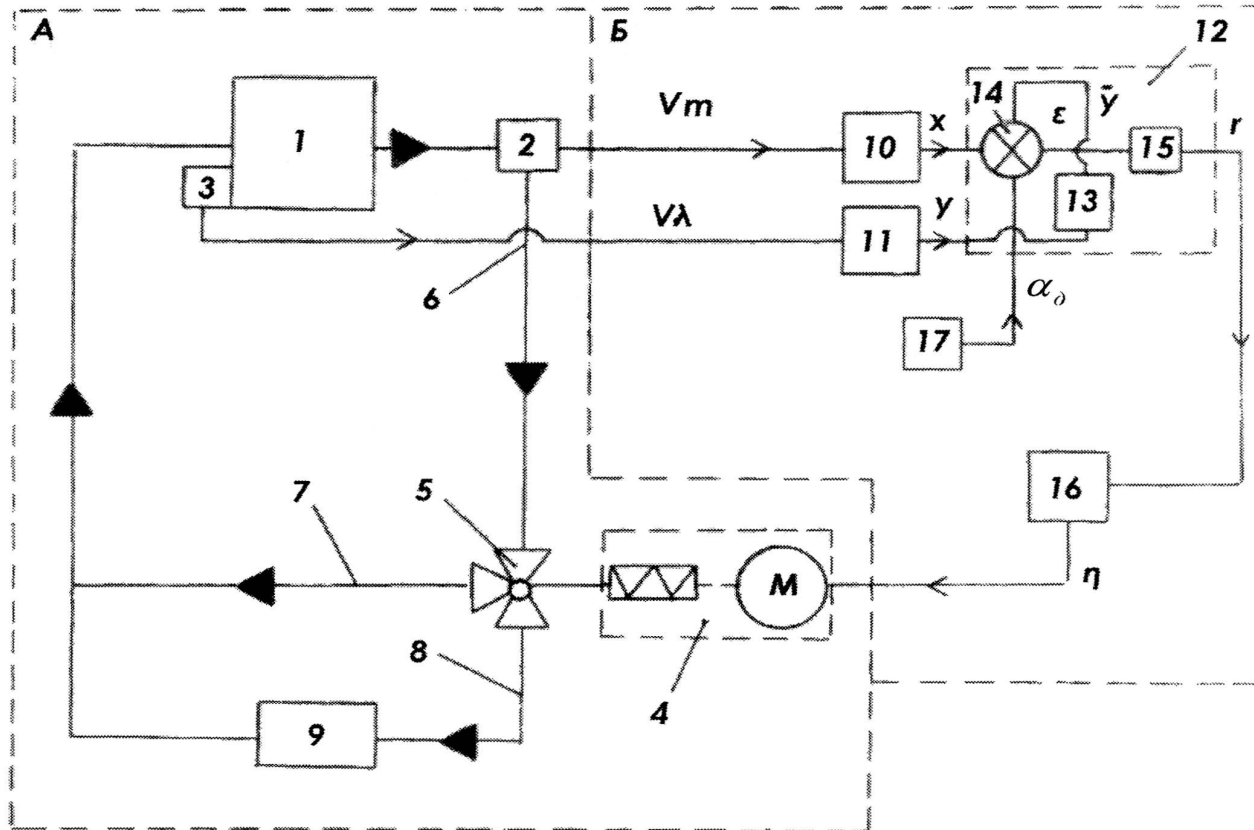
6,7 – каналы охлаждающей воды;

в - ТМ



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

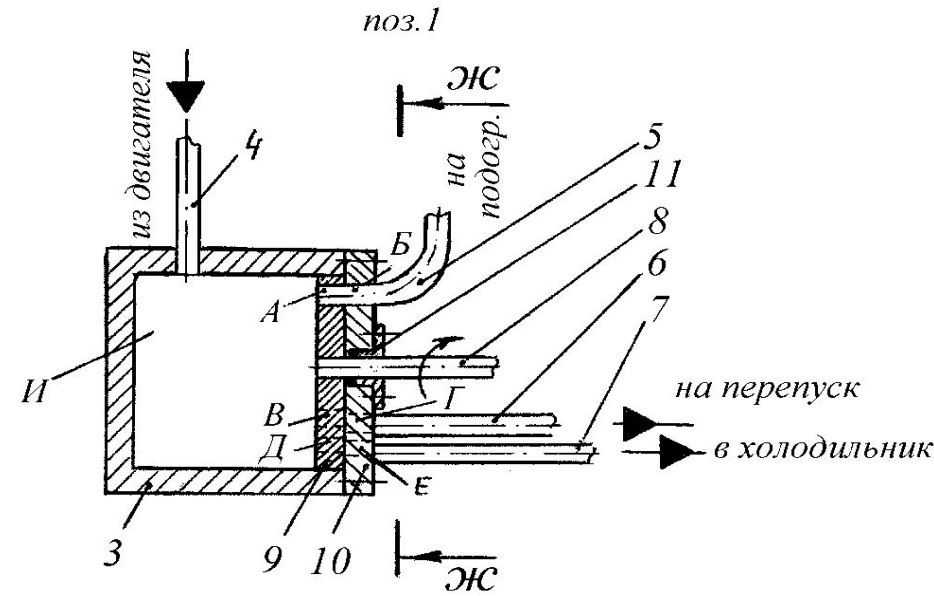
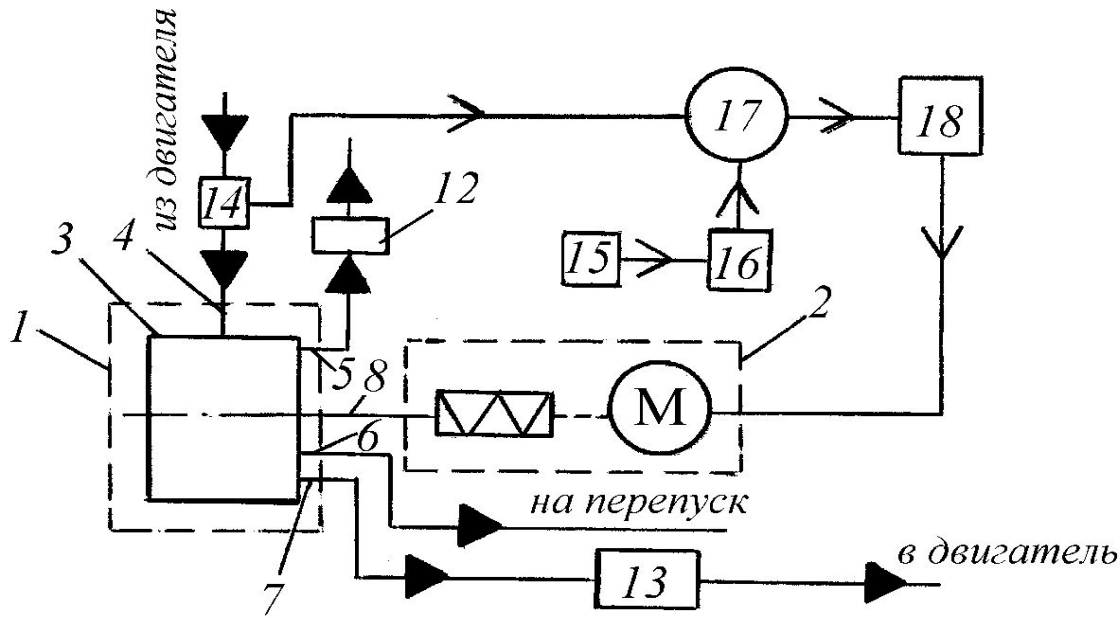
– передаточный статический коэффициент



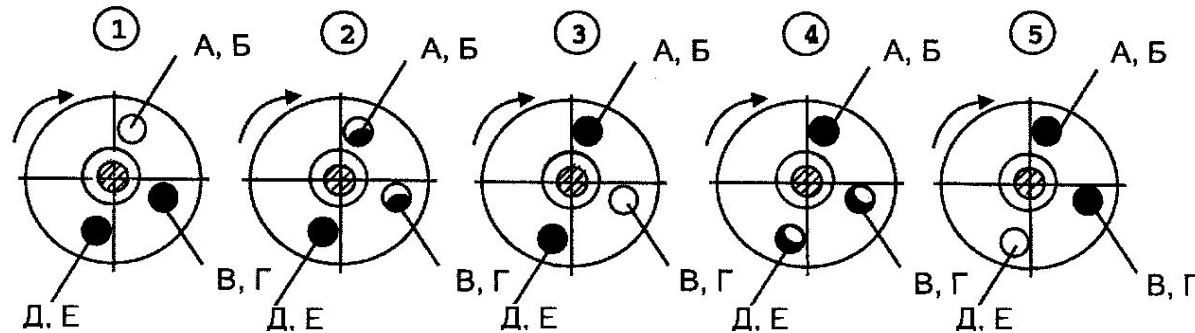
микропроцессорный блок управления

А - непрерывная часть, Б - дискретная часть

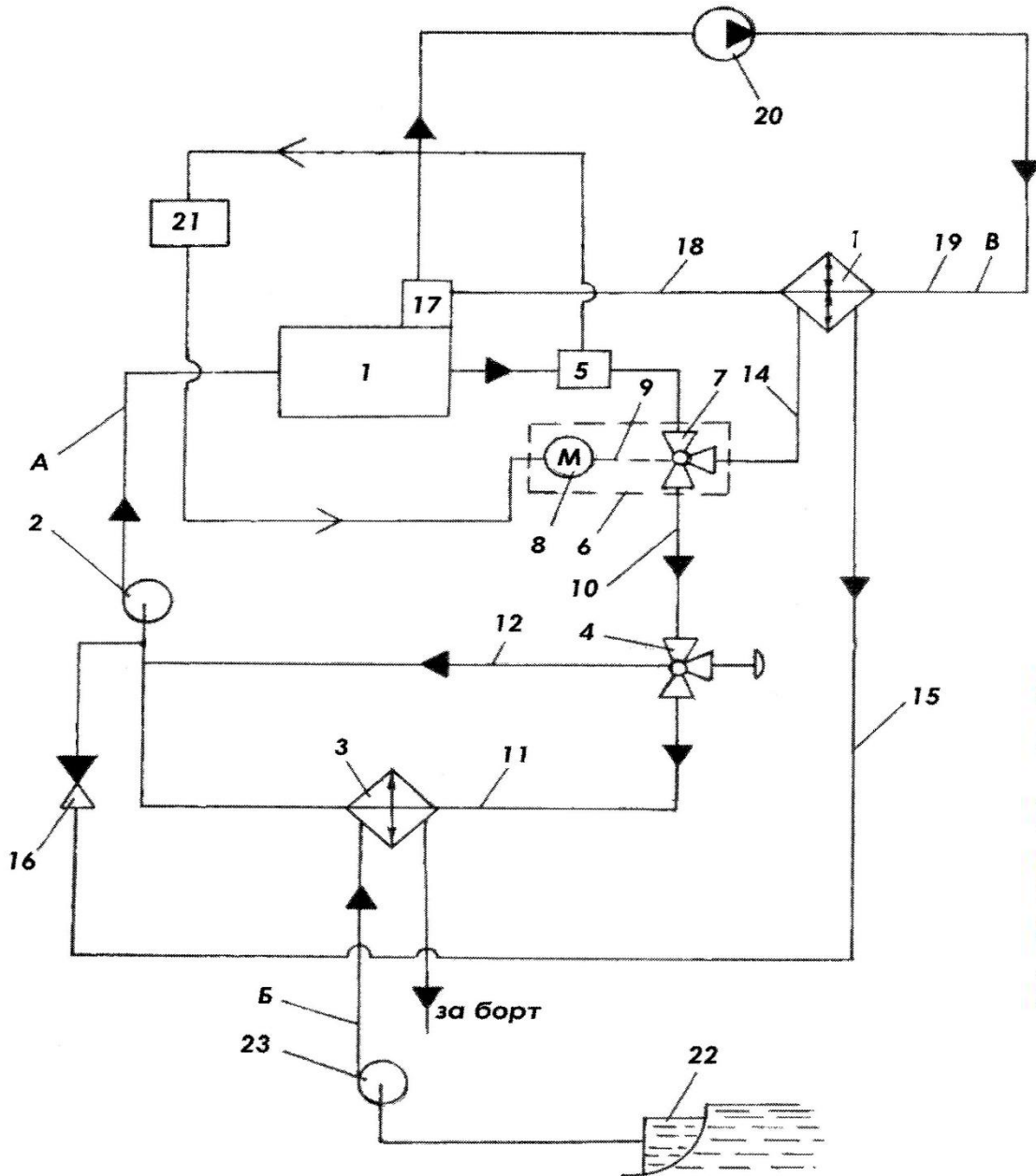
1 - двигатель, 2 - ДТ, 3- ДН, 4 - ИМ, 5 - РО, 6,7,8 - каналы охлаждающей жидкости, 9 - холодильник, 10,11 - АЦП, 12 - микроконтроллер, 13 - компенсирующий узел, 14 - блок сравнения, 15 - регулирующий узел, 16 - ЦАП, 17 - задатчик.



ЖС-ЖС



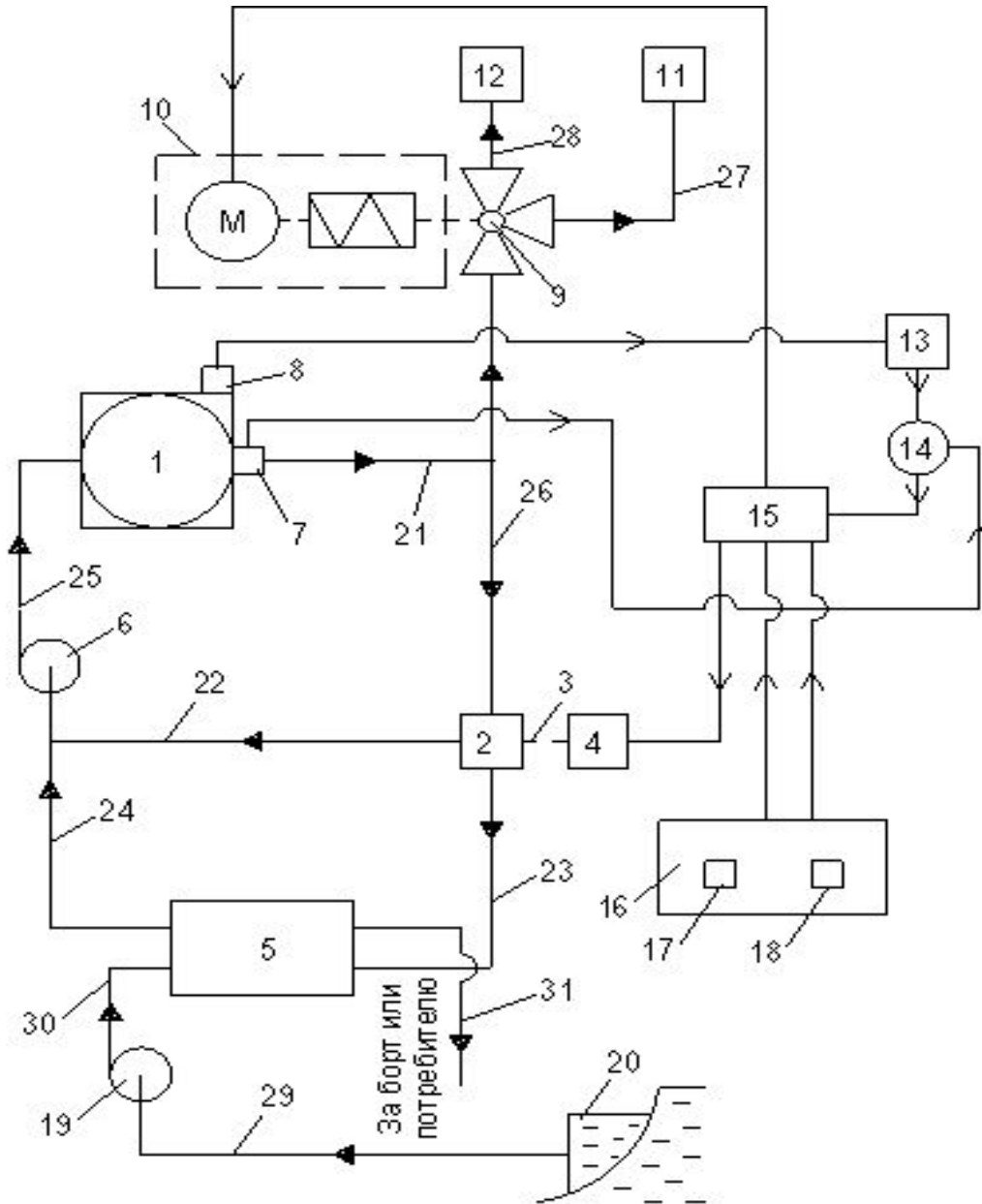
1 – РО; 2 – электрический ИМ; 3 – корпус РО; 4, 6, 7 – патрубки; 5 – патрубок дополнительный;
 8 – вал; 9 – клапан вращающийся; 10 – крышка; 11 – сальник-уплотнитель; 12 – подогреватель;
 13 – холодильник; 14, 15 – ДТ, ДН; 16 – задатчик; 17 – БС; 18 – БУ



- 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, передаваемой, 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.

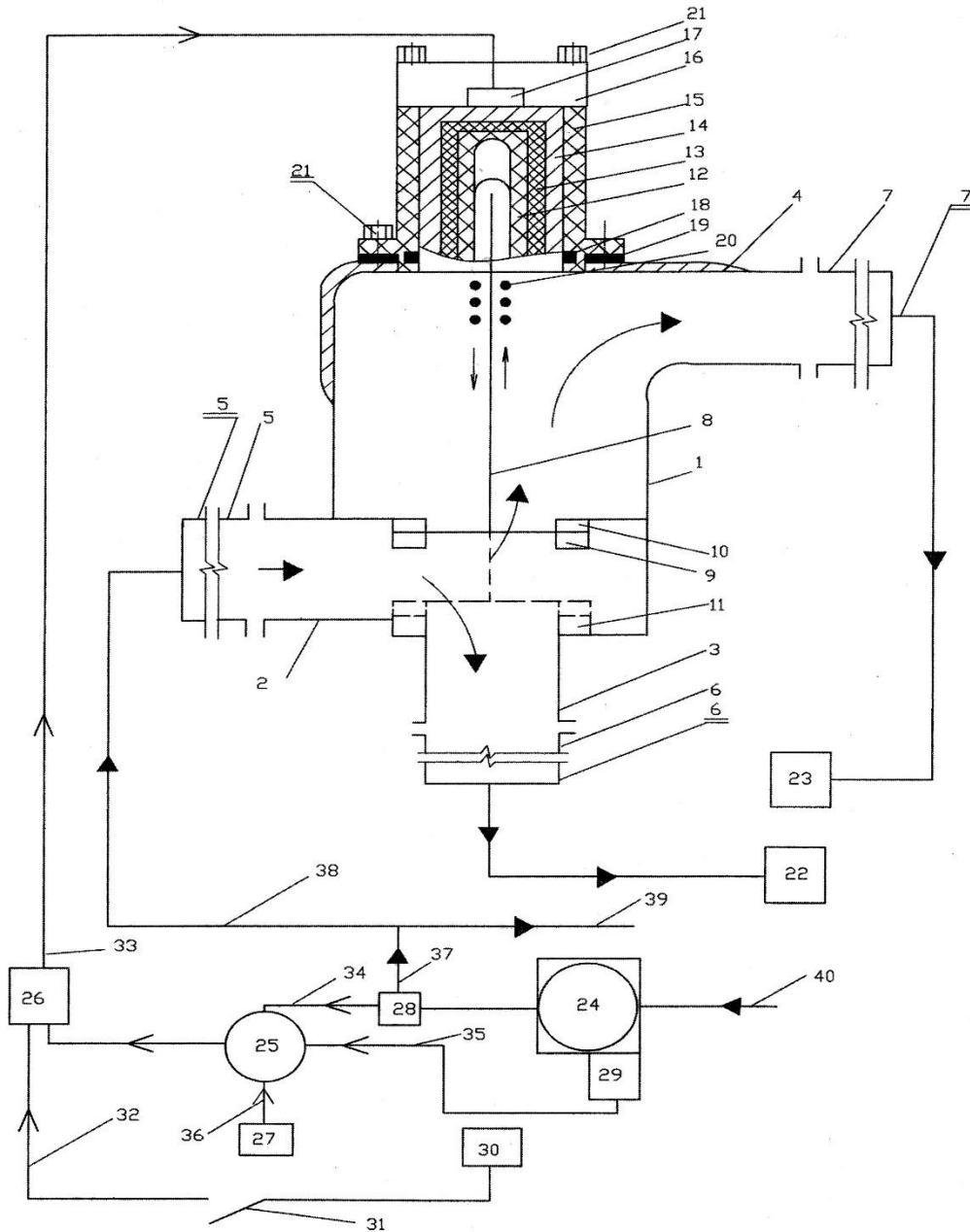
Таким образом, $Q_{\text{под}} = f(P_e)$.



- 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

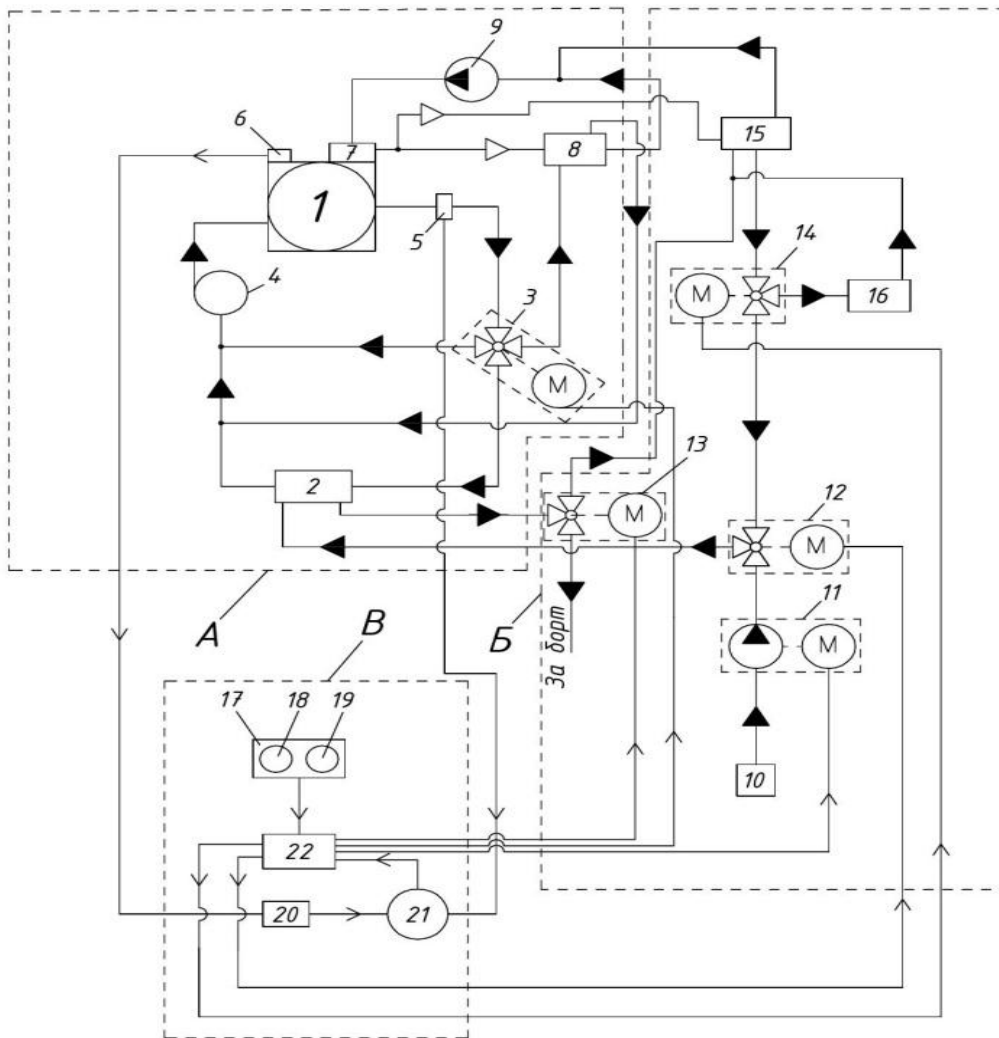
14₃



- 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

14₄



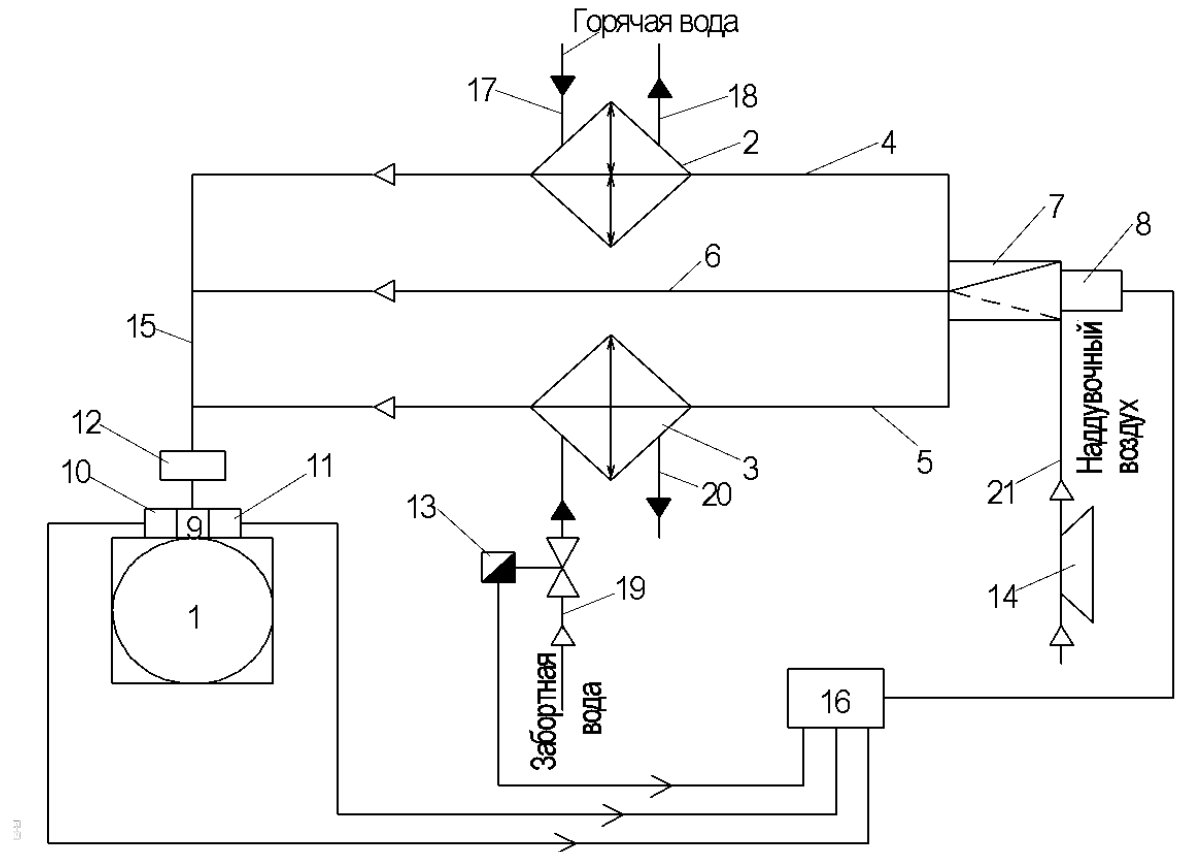
- А – внутренний контур: 1 – дизель;
2 – жжх; 3 – многофункциональный ТРГ с четырехходовым краном (МТРГ);
4 – циркуляционный насос; 5,6 – ДТ и ДН;
7 – УК; 8 – теплообменник;
Э – циркуляционный насос; Б – внешний контур: 10 – кингстон; 11 – электрический насос; 12, 13, 14 – электрические ТРГ;
15 – АБХМ; 16 – потребитель хладоносителя;
В – 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)

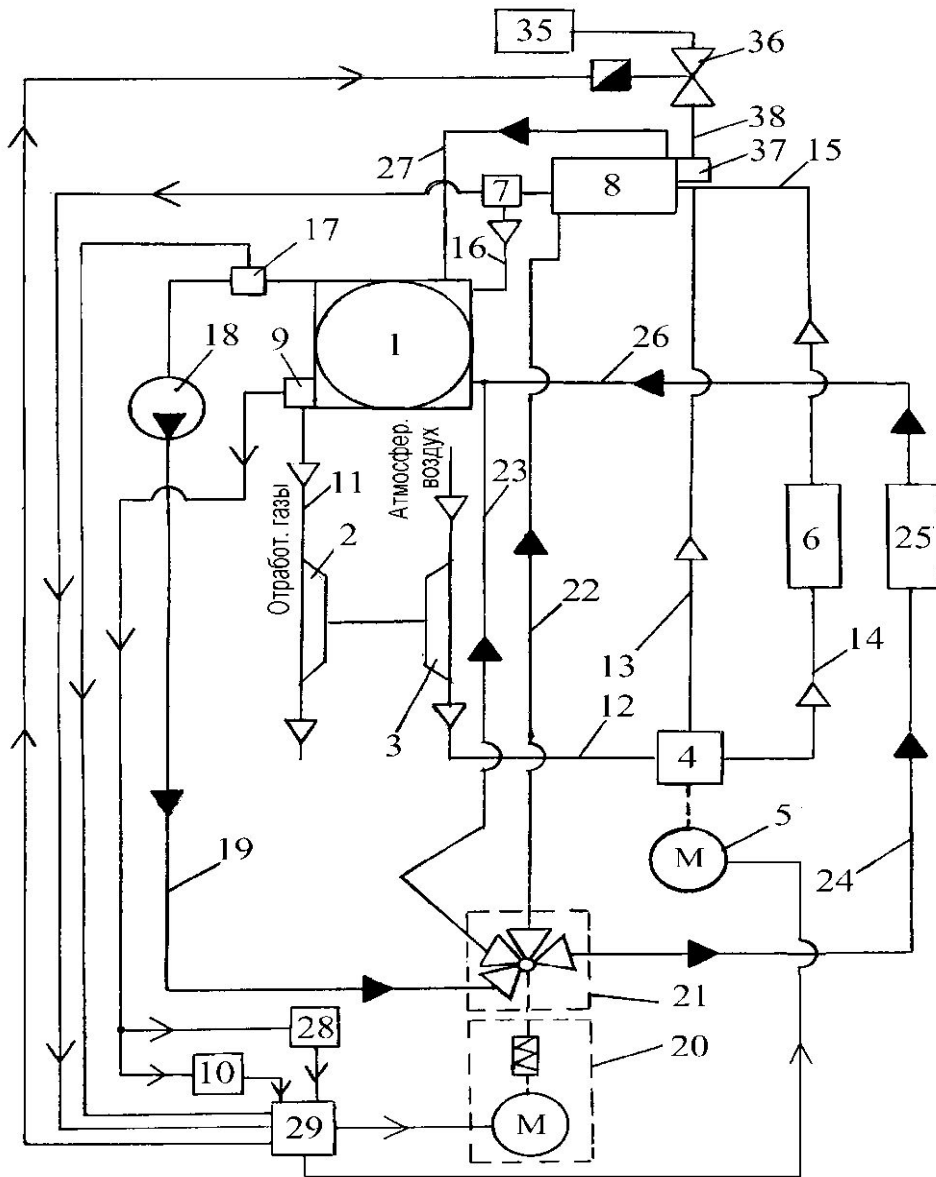
15,
1

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



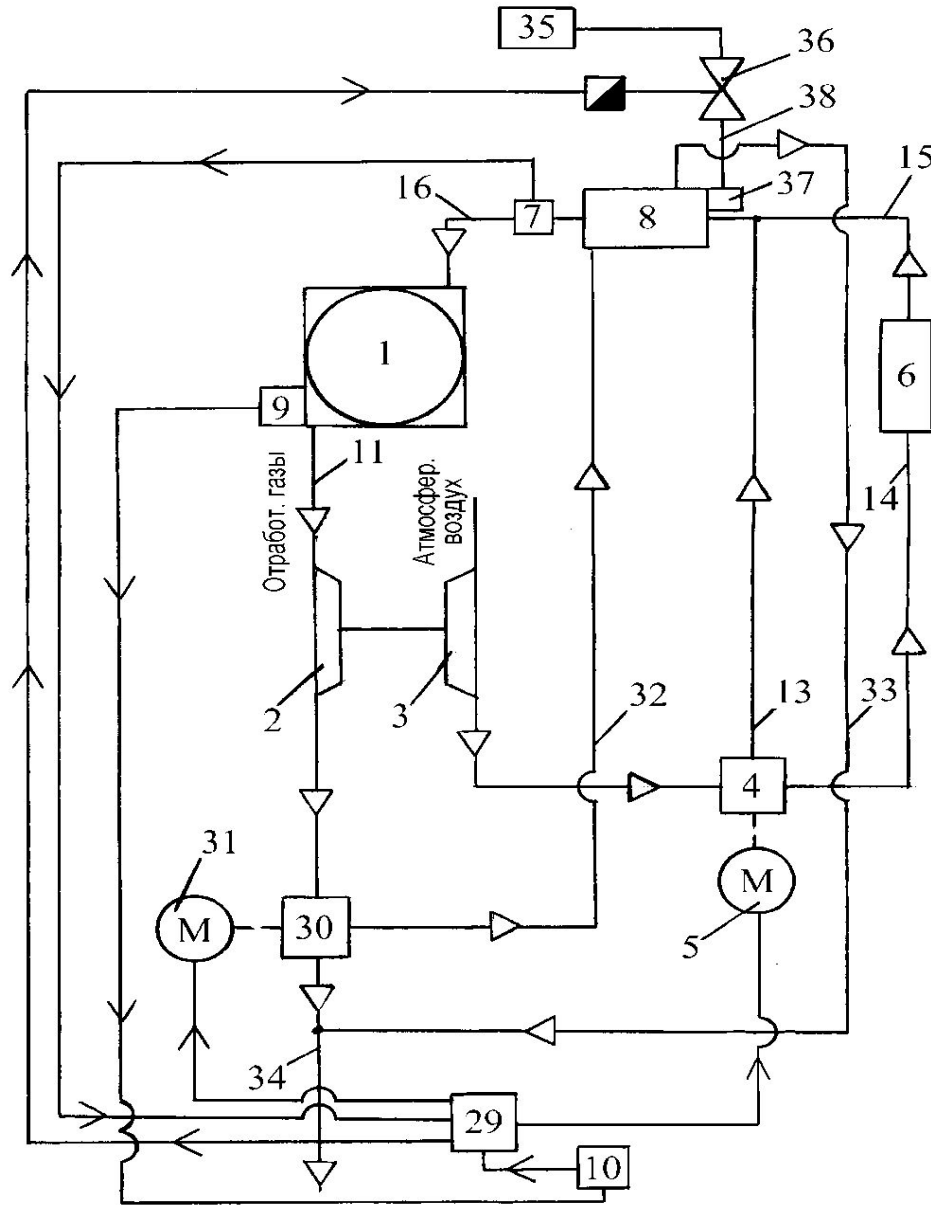
СО НВ ДВС (Патент №2251021)

15₂



- 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

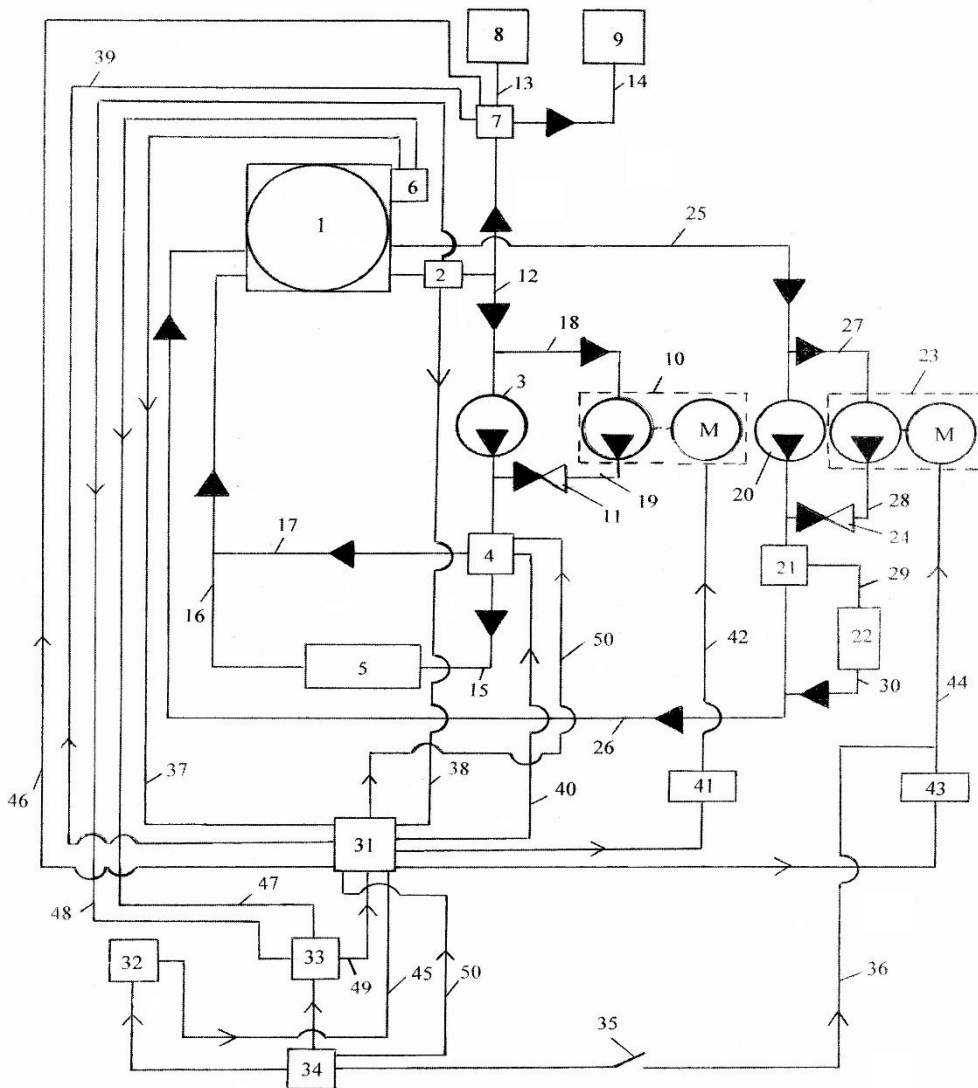
$P_e \leq 0,4 P_{ен}$ – подогрев;
 $P_e \geq 0,4 P_{ен}$ – охлаждение



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

СИСТЕМА АВАРИЙНОЙ ОСТАНОВКИ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ (Патент №76983)

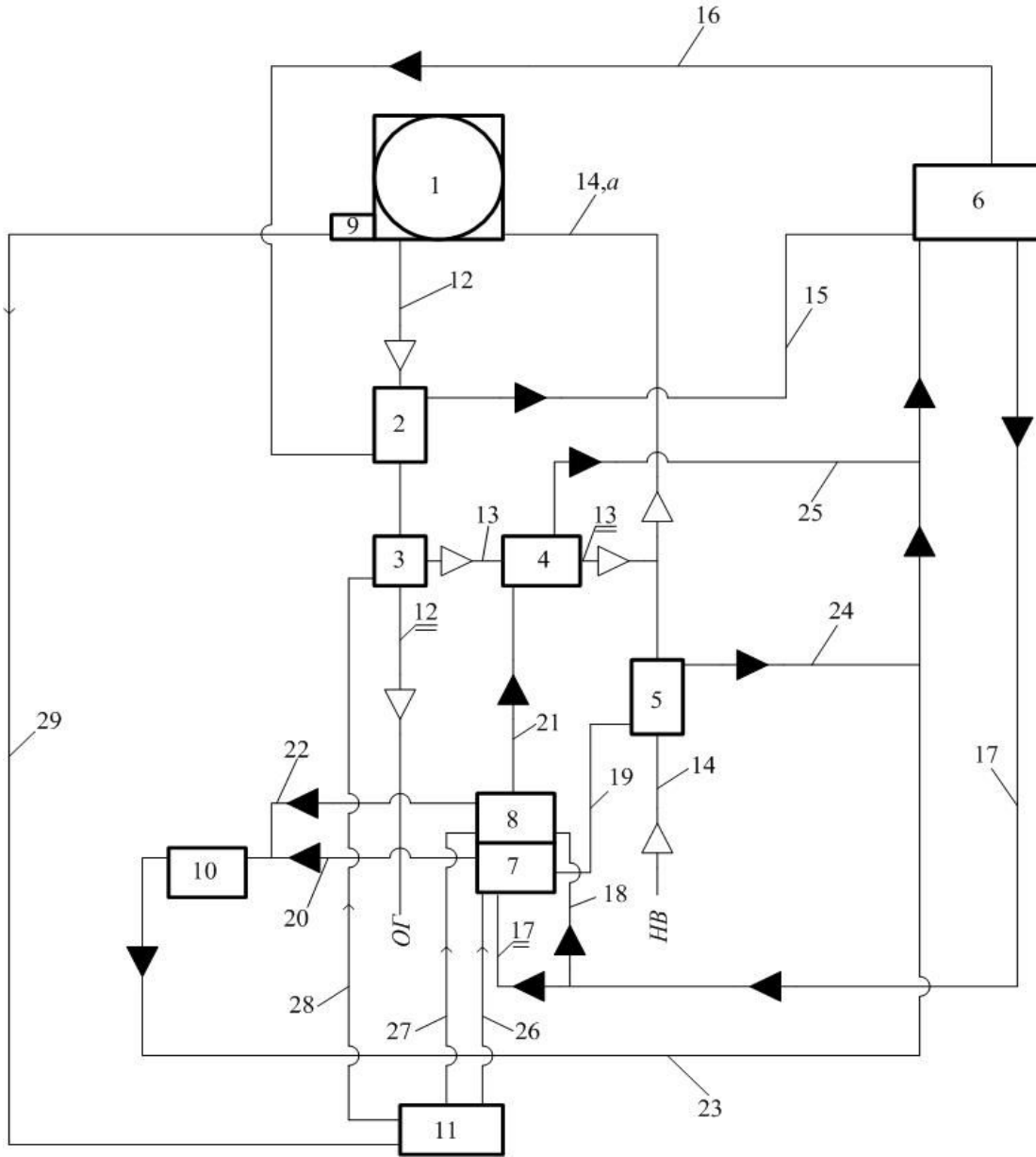
16



- 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

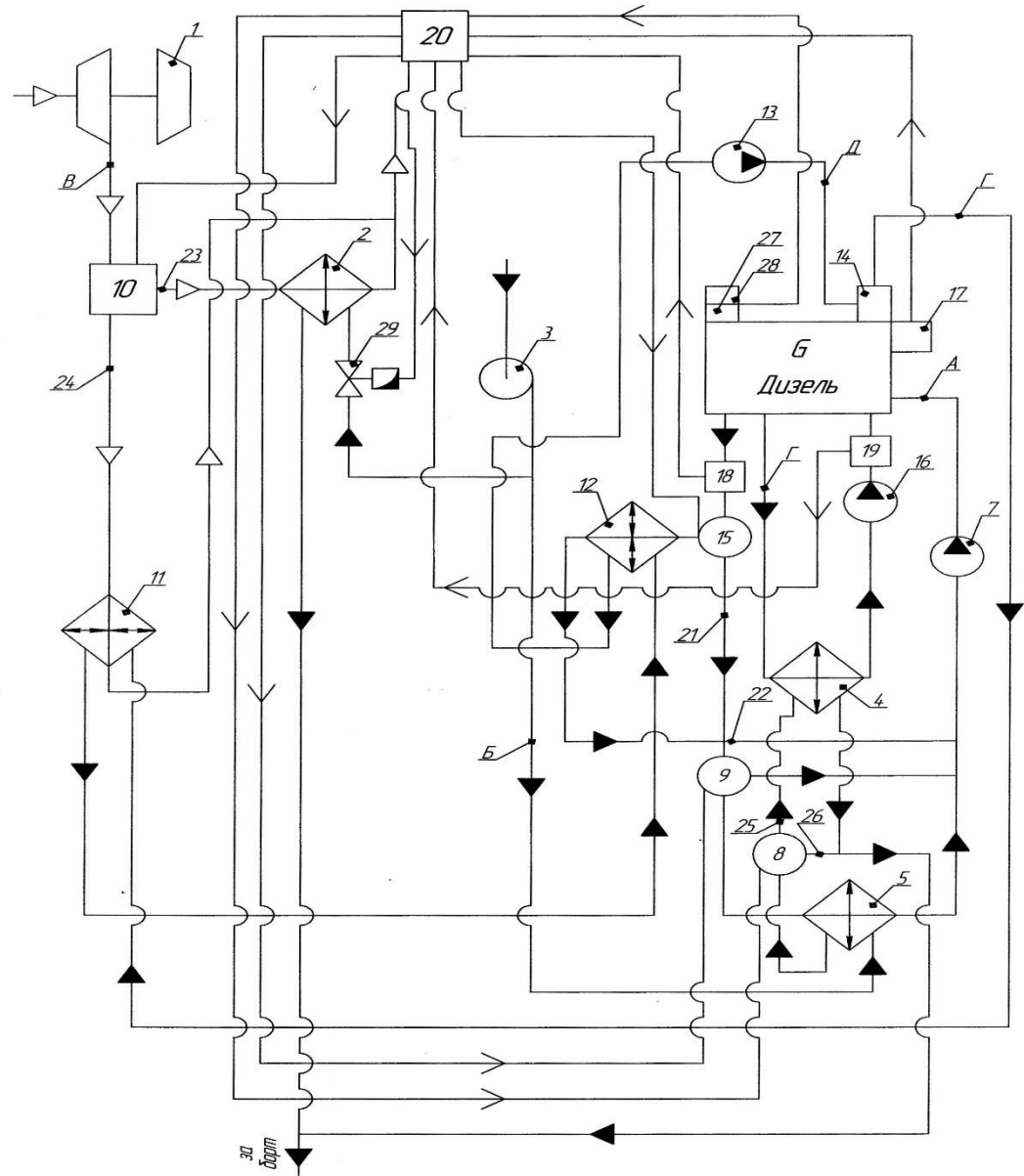


1 – дизель; 2 – УК; 3 – распределитель ОГ;
4 – охладитель ОГ; 5 – охладитель НВ;
6 – АБХМ; 7, 8 – электронные ТРГ;
10 – потребитель; 11 – БУ 12 - канал ОГ;
13 – рециркуляционный канал; 14,а – канал
НВ и ОГ; 14 – канал НВ; 15,16 – каналы
теплоносителя системы УК;
17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 – каналы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

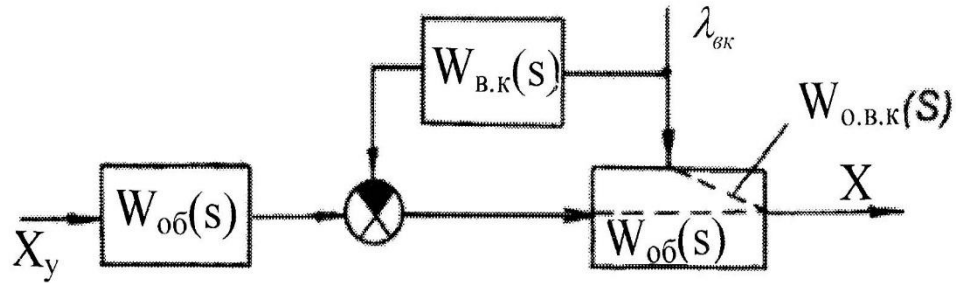
Раствор бромистого лития обеспечивает
устойчивую работу АБХМ при температуре
кипения воды в испарителе 276-279 К. Водный
раствор соли бромистого лития
пожаровзрывобезопасен и нетоксичен, все
процессы протекают вакуумом, (6÷8 мм рт. ст.)

- 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



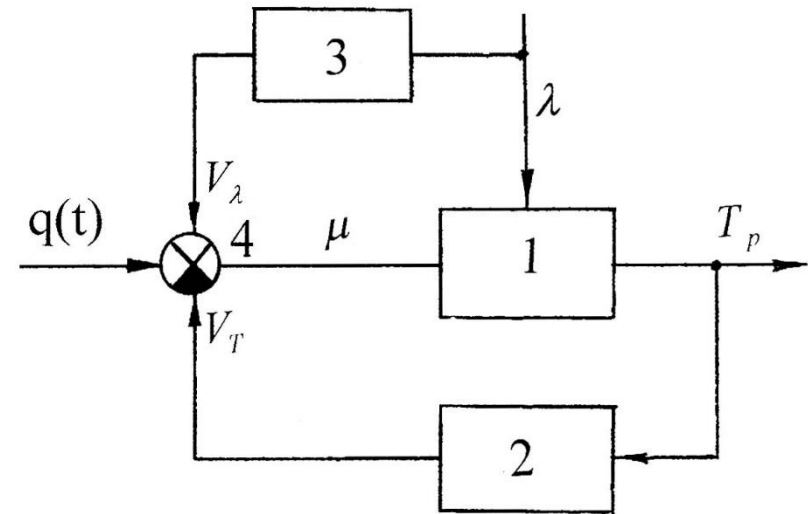
Регулирование температуры в СО,
ССМ, СНВ

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО ВОЗМУЩЕНИЮ



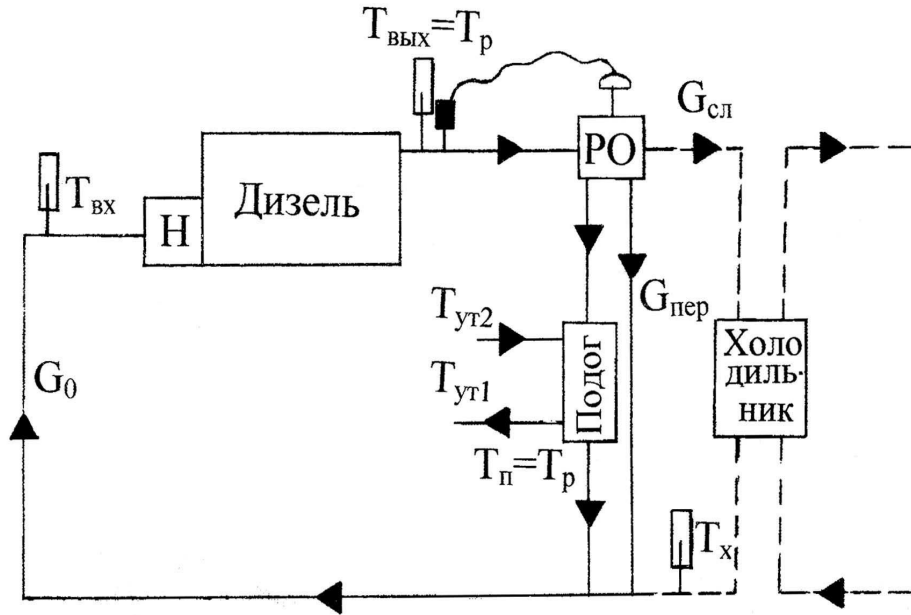
Сочетание метода компенсации с принципом обратной связи

КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА САРТ



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

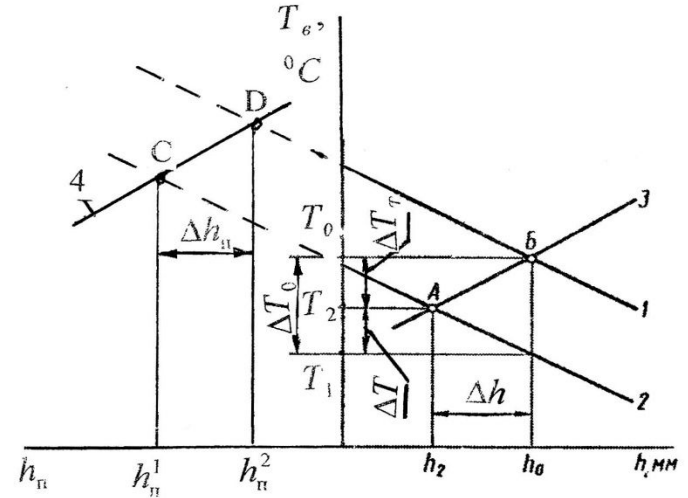
СХЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В СО СПОСОБОМ ПЕРЕПУСКА



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

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

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

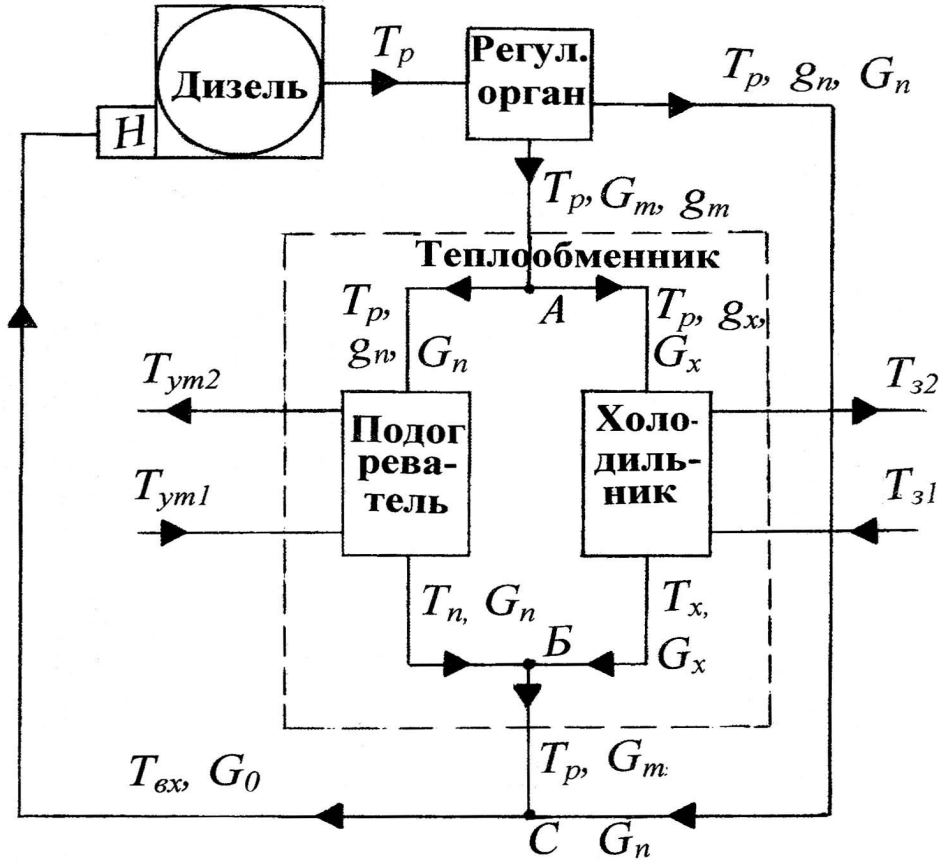
$$\Delta T_0 - \Delta T_\tau = T_2 - T_1 = \Delta T.$$

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

терморегулятора охлаждающей воды на величину ΔT_τ .

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

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СПО ПЕРЕПУСКОМ



Уравнение динамики по каналу нагрузочного воздействия

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

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

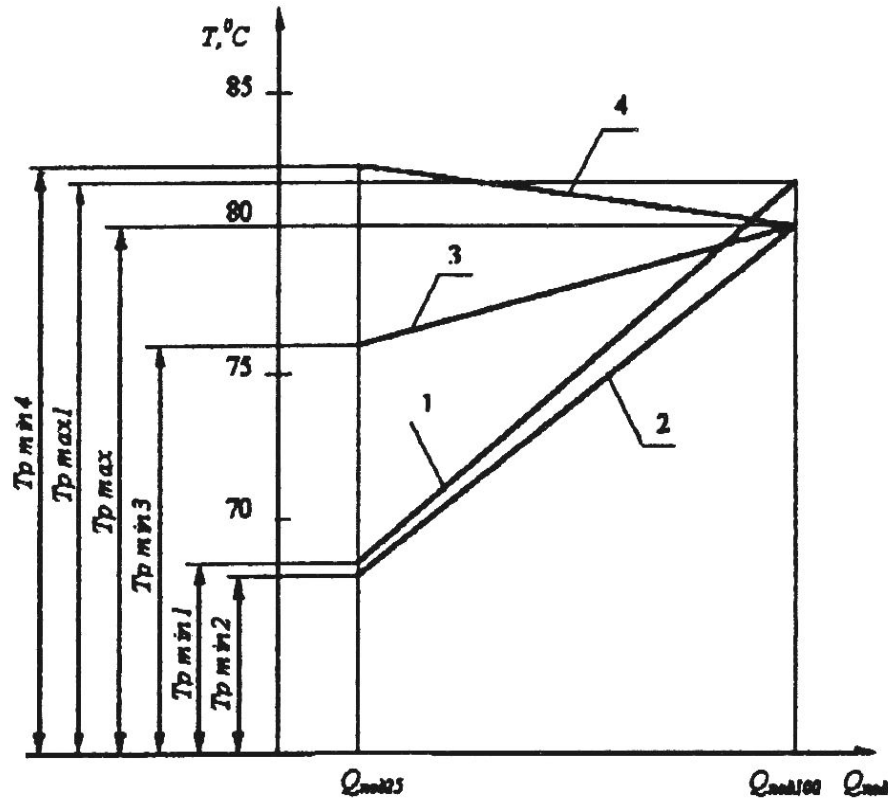
$$W_{0\lambda}(s) = \frac{K_{0\lambda}}{T_{a\lambda} s + 1} e^{-\tau_{0\lambda} s}$$

Уравнение динамики по каналу регулирующего воздействия

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

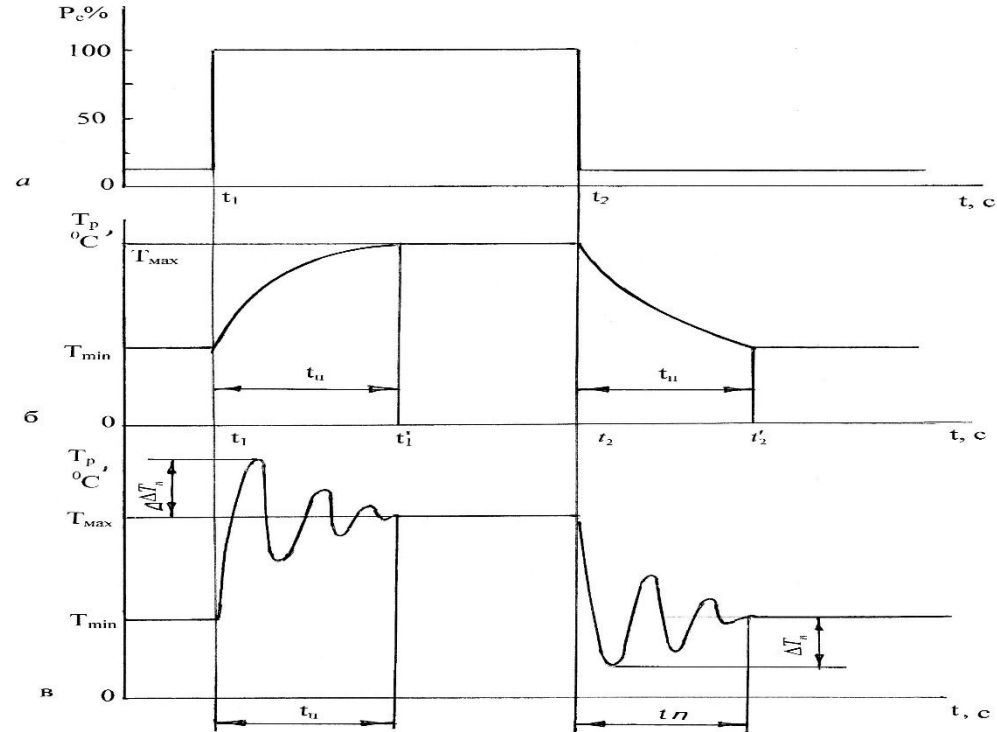
$$K_{0\mu} = \frac{c G_0 (T_{p0} - \xi T_{r0}) g_{xN}}{c g_r G_0 - \alpha_d F_d} \frac{g_{xN}}{T_{pN}}; W_{0\mu} = \frac{K_{0\mu}}{T_{0\mu} s + 1} e^{-\tau_{0\mu} s}$$

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

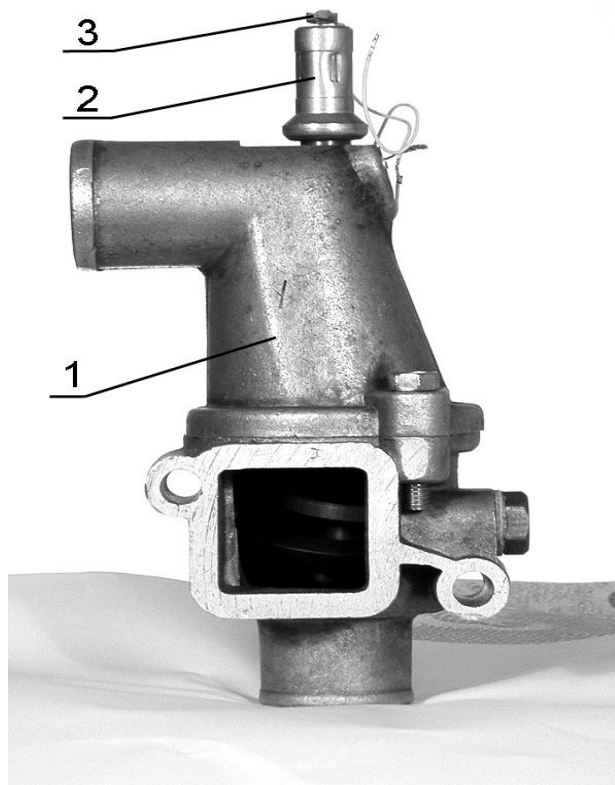


а – динамическая характеристика нагрузки дизеля;
 б – апериодическая характеристика СА
 РТ; в – колебательная динамическая характеристика САРТ
 дизеля

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.

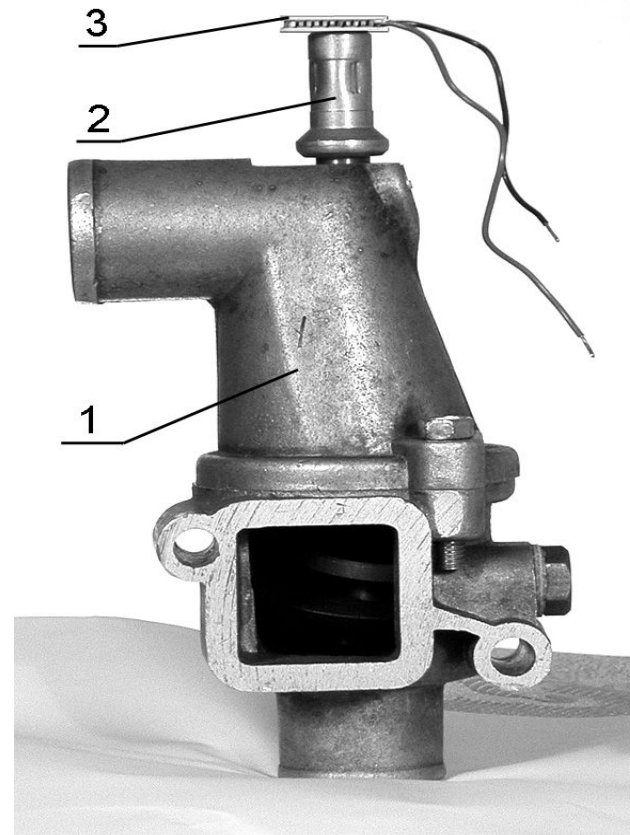
ТРГ С ТН И С НАГРЕВАТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

22₁



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.

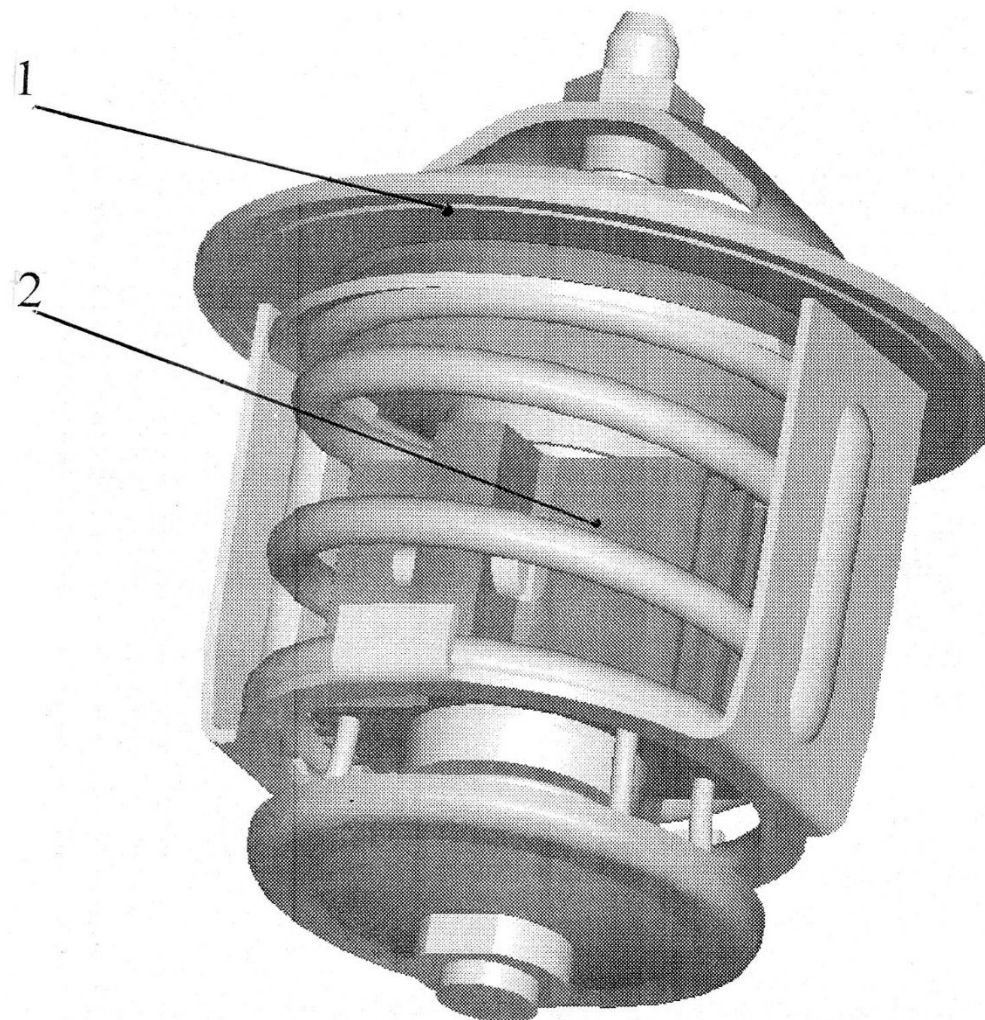


С термоэлектрическим элементом:
1 – корпус, 2 – ТСД, 3 – ТМ

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, ΔT_{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

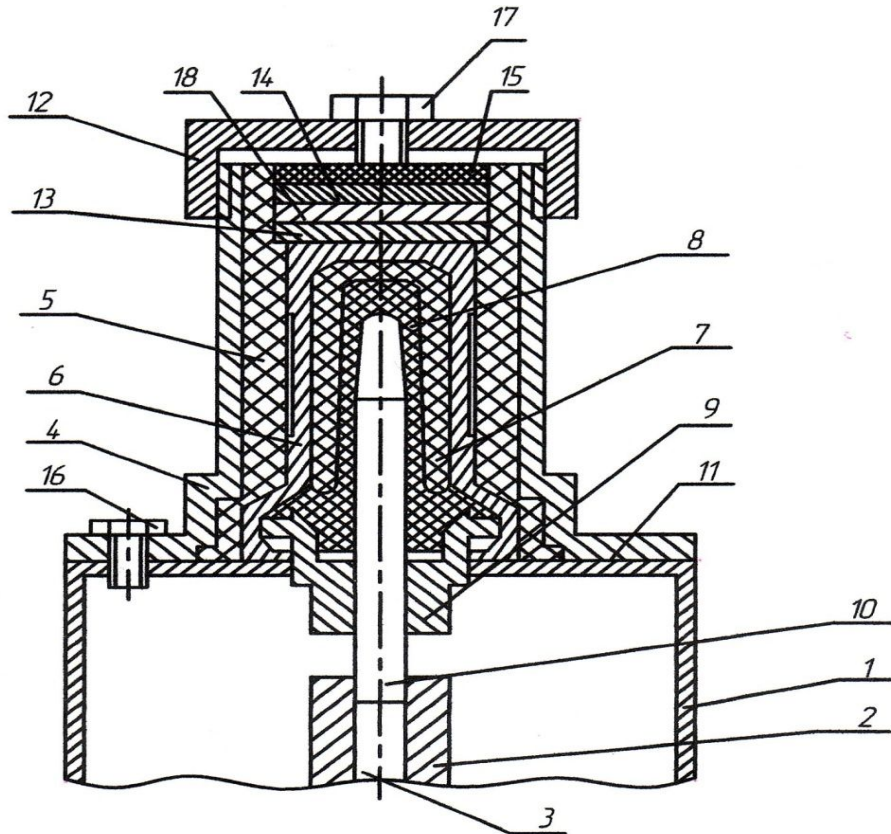
22₂



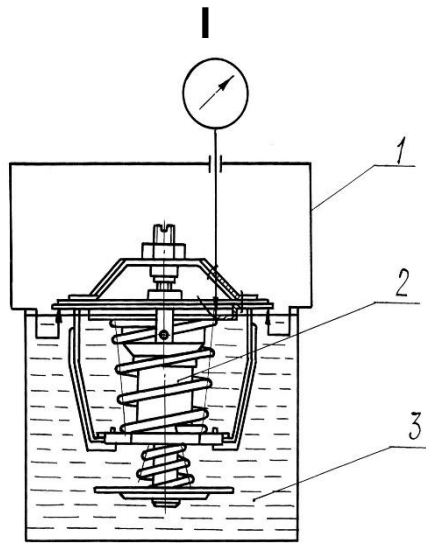
1 – штатный терморегулятор; 2 – термоэлектрический блок

КОНСТРУКТИВНЫЙ ЧЕРТЕЖ ТРГ С
ТН И ЭН

ОПЫТНЫЙ ОБРАЗЕЦ

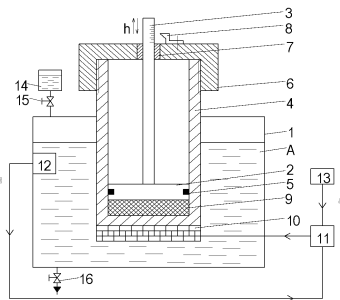


- 1 – корпус ТРГ, 2 – втулка, 3 – шток, 4 – корпус ЭН,
5 – теплоизолятор, 6 – гильза, 7 – ТН, 8, 9 – втулка,
10 – шток, 11 – прокладка, 12 – гайка, 13, 14 – контакты,
15 – шайба, 16, 17 – винты крепежные, 18 – ЭН (позистор)

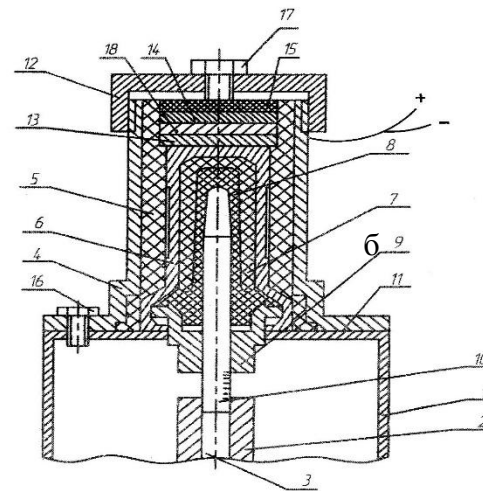


1 – приспособление с индикаторной стойкой; 2 – термостат; 3 – термованна

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

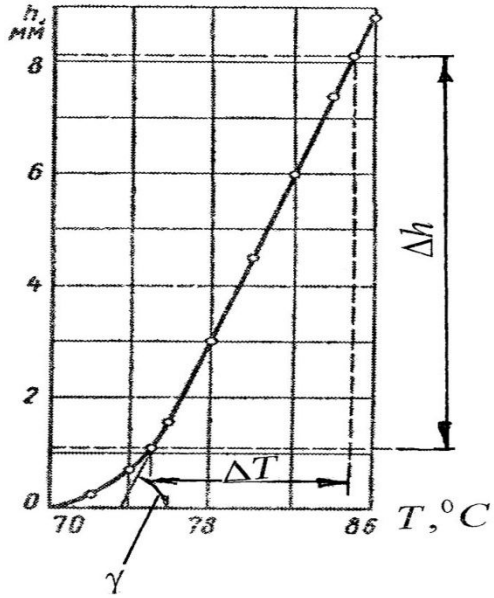
Технические характеристики электронагревателя ЭНЭС -7А:

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

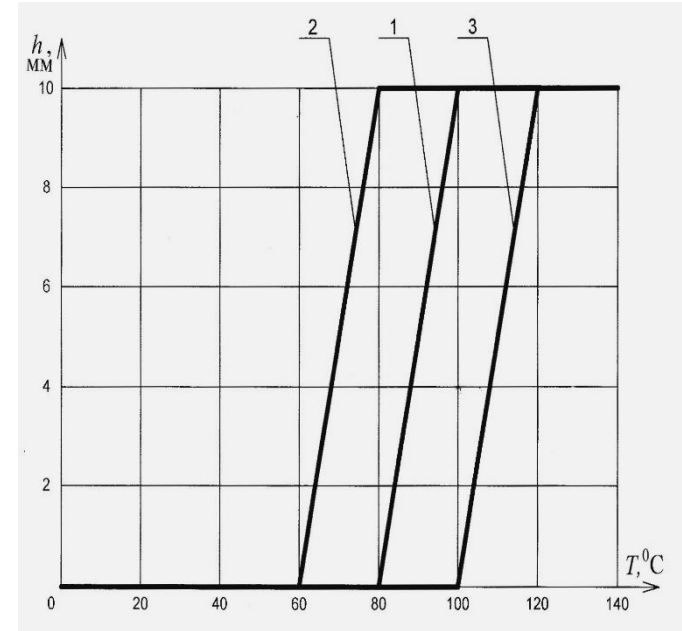


Макет с ТН, ЭН и МБУ: 1 – корпус макета, 2 – корпус ЭН и ТН, 3,4 – каналы подачи и отвода жидкости, 5 – БУ, 6 – блок питания

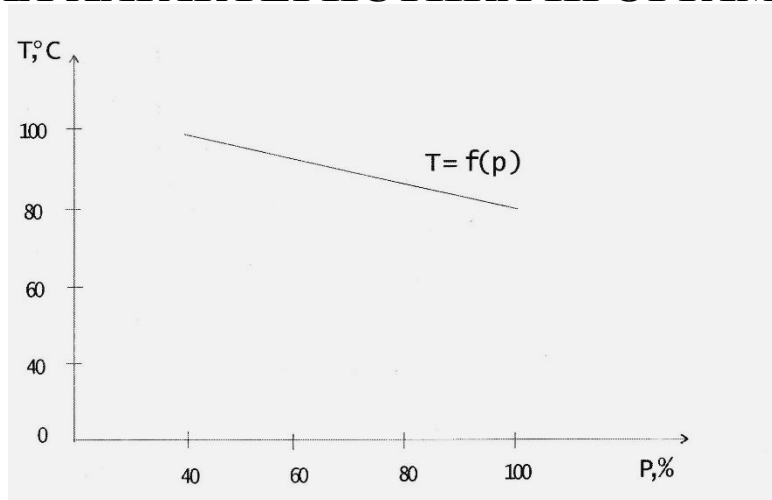
СТАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРГ



СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРГ С ТН И НЭЛ

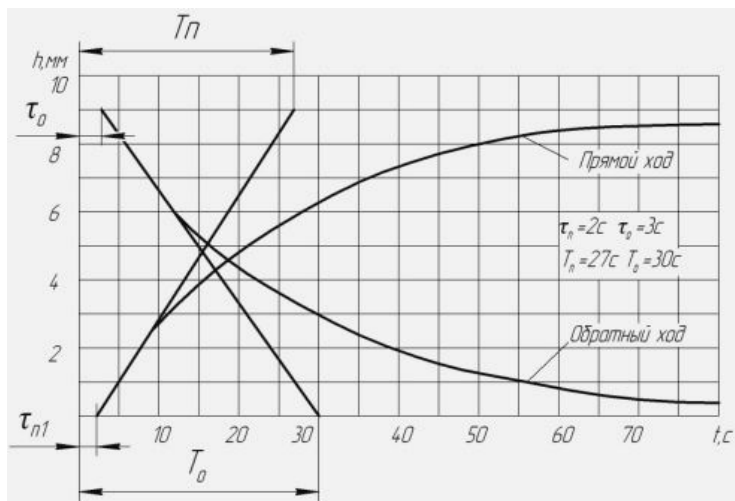


СТАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОГРАММИРУЕМОГО ТРГ

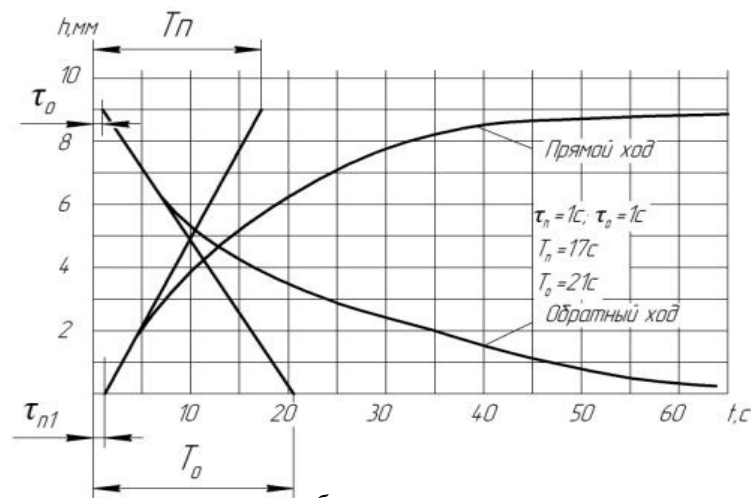


ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ФУНКЦИИ ТРГ

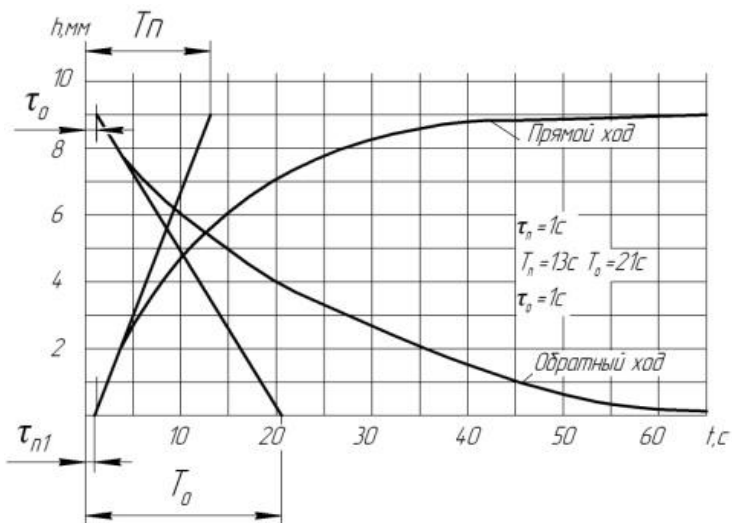
25₁



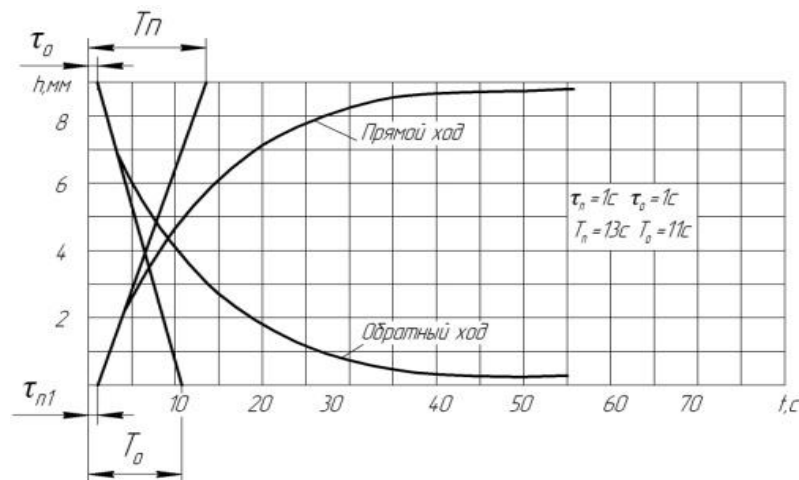
а



б



в

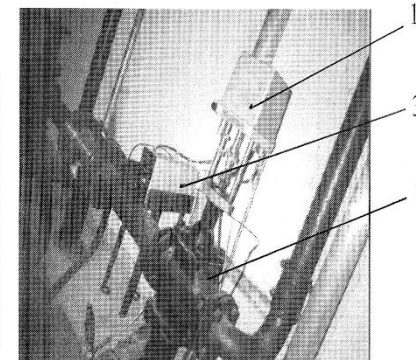
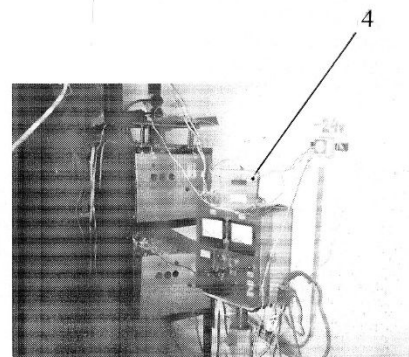
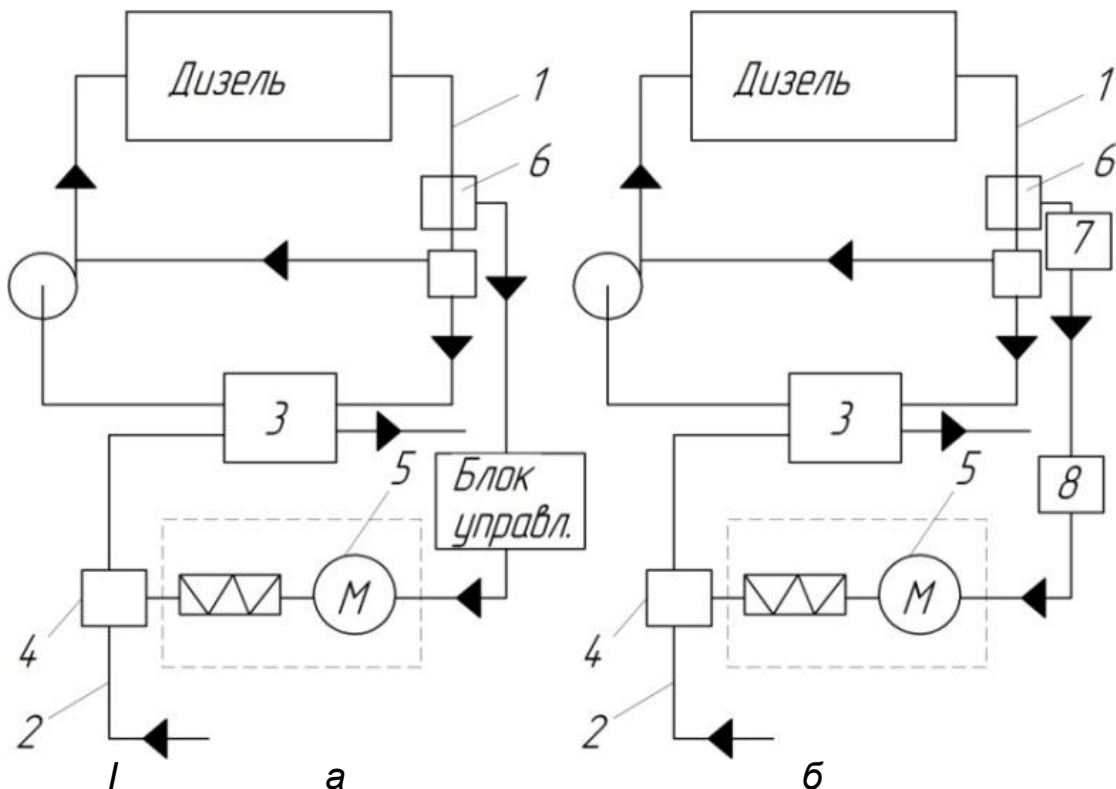


г

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

25₂



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:

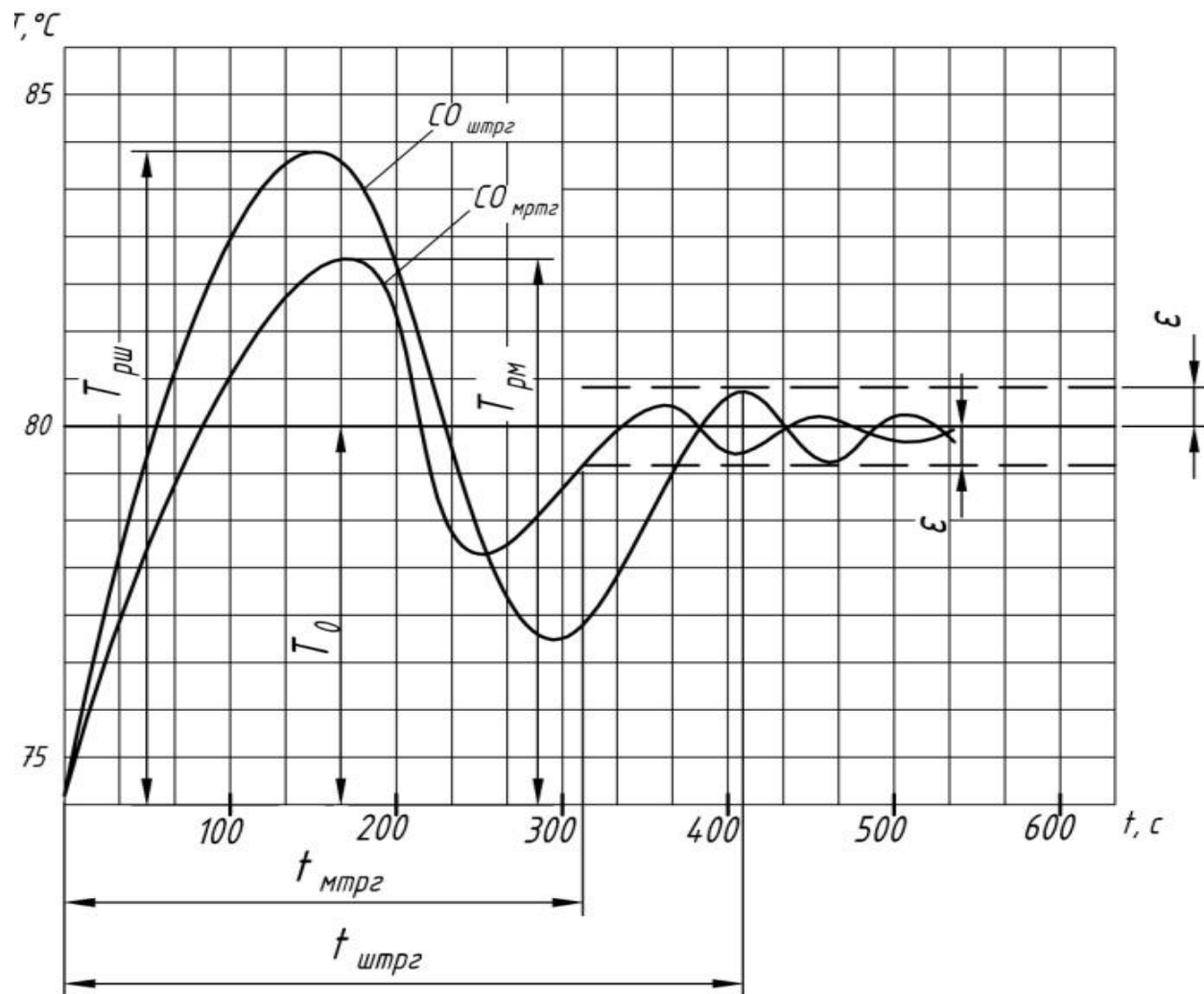
а – 4 – МБУ; б – 1 – ИМ, 2 – РО, 3 – ПБР-3; в – пульт управления

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

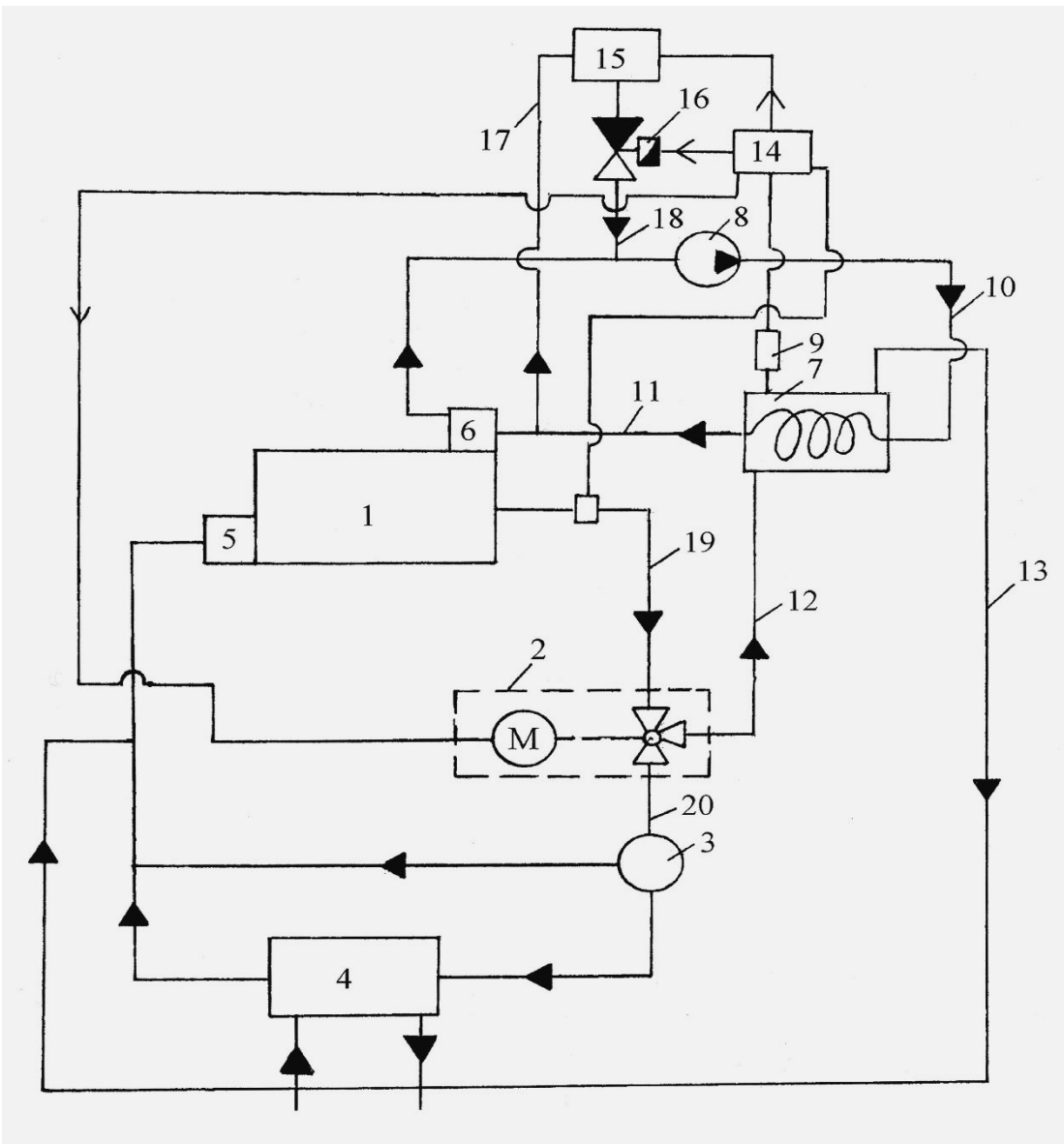
2. Исполнительный механизм, типа КТ1:

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

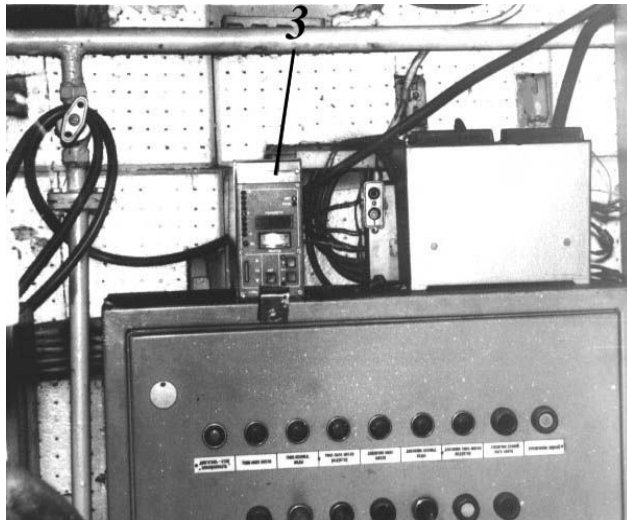
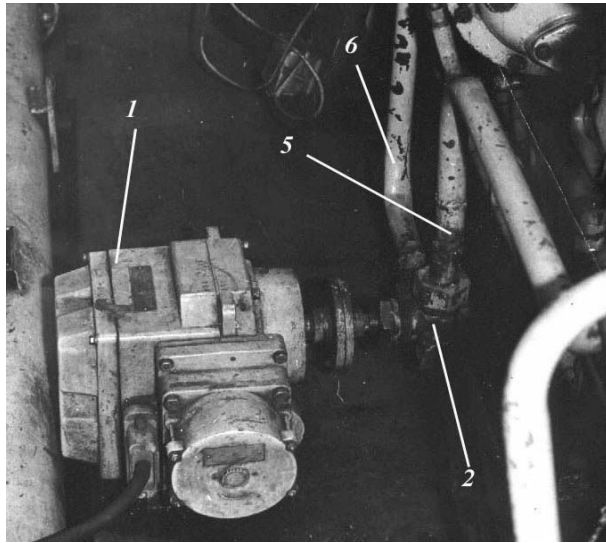
3. Микропроцессорный БУ выполнен на базе однокристальной микроЭВМ типа К1816.



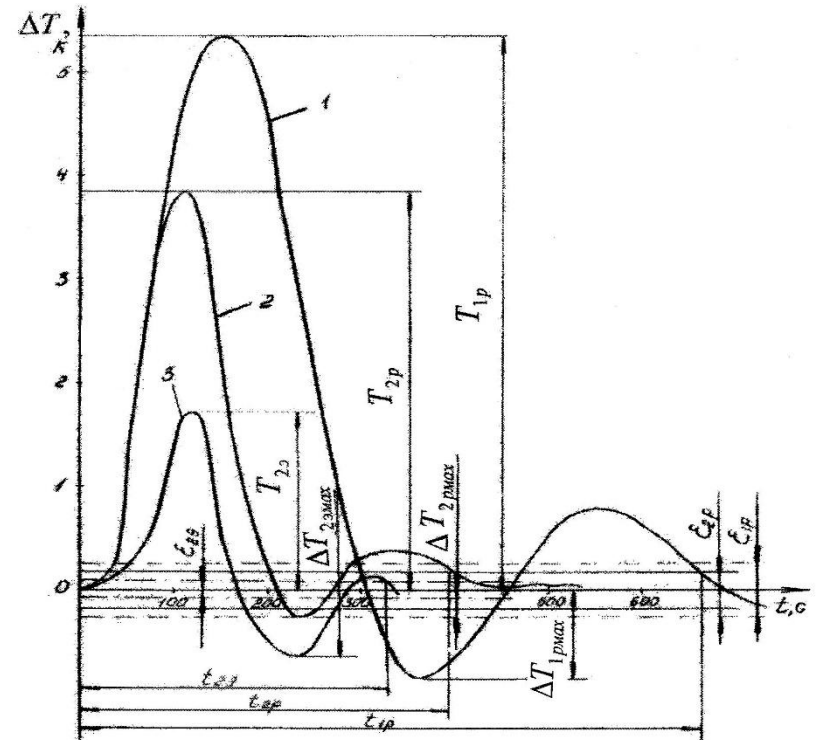
$CO_{штрг}$ – CO со штатным ТРГ; $CO_{мтрг}$ – CO с микропроцессорным ТРГ



- 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

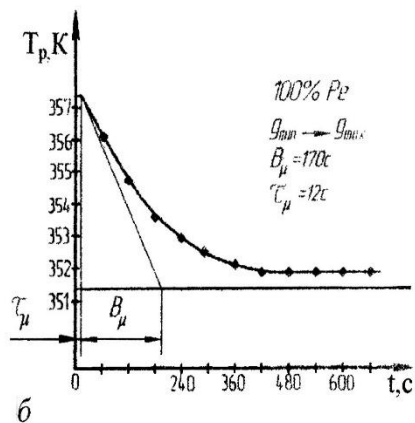
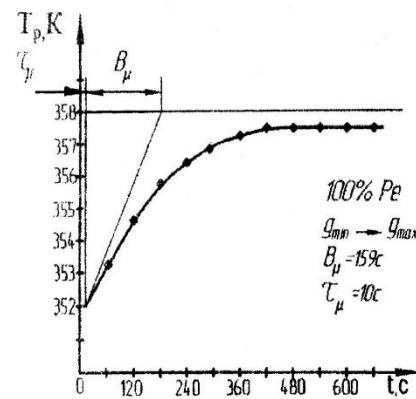
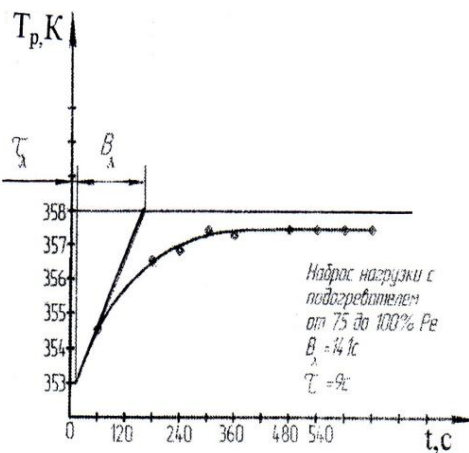
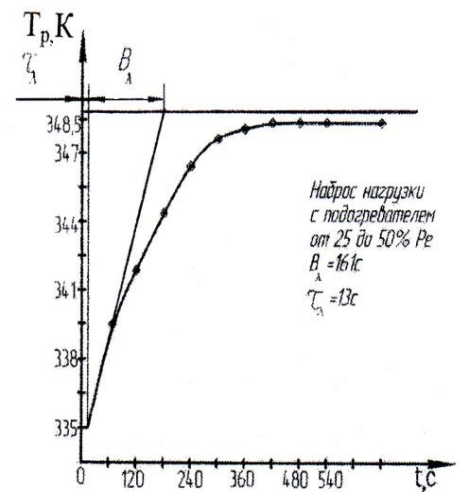
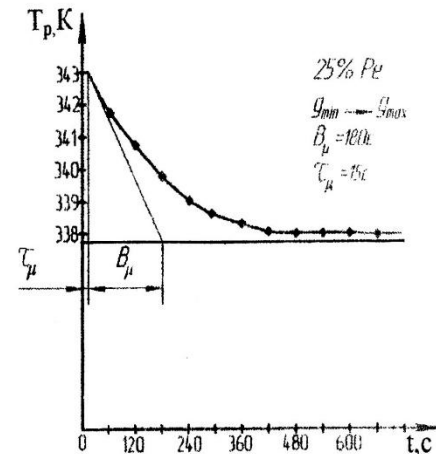
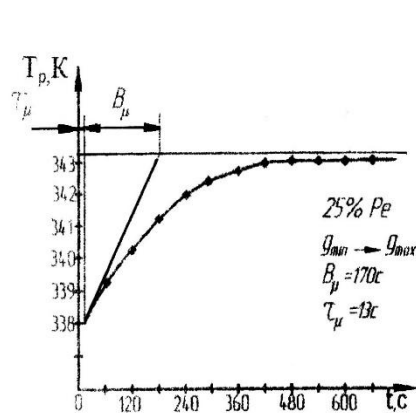
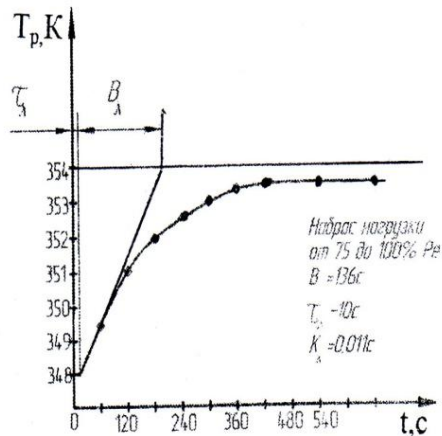
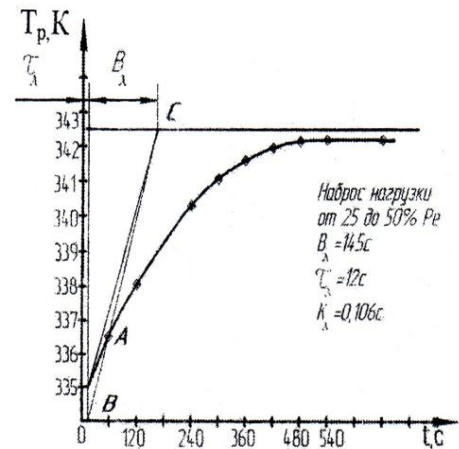


1 – расчетный переходный процесс с ТРГ РТВ 52; 2 – расчетный переходный процесс с электронным ТРГ; 3 – экспериментальный переходный процесс с РИТРГ

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 30



a

a

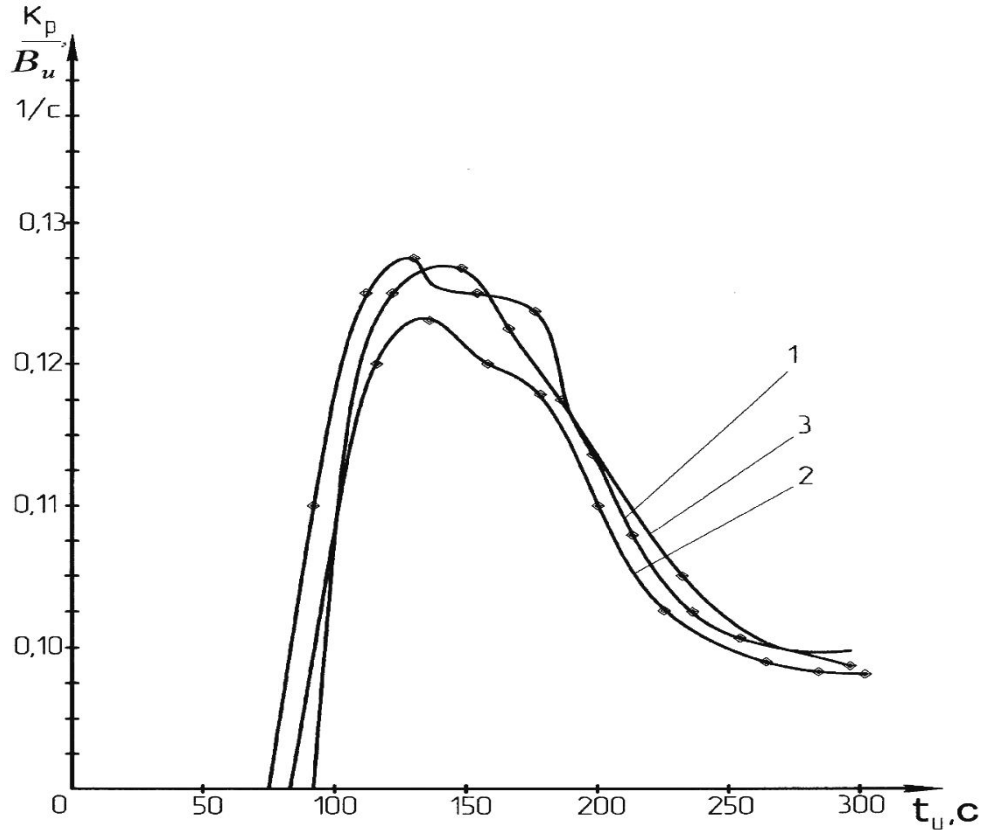
б

б

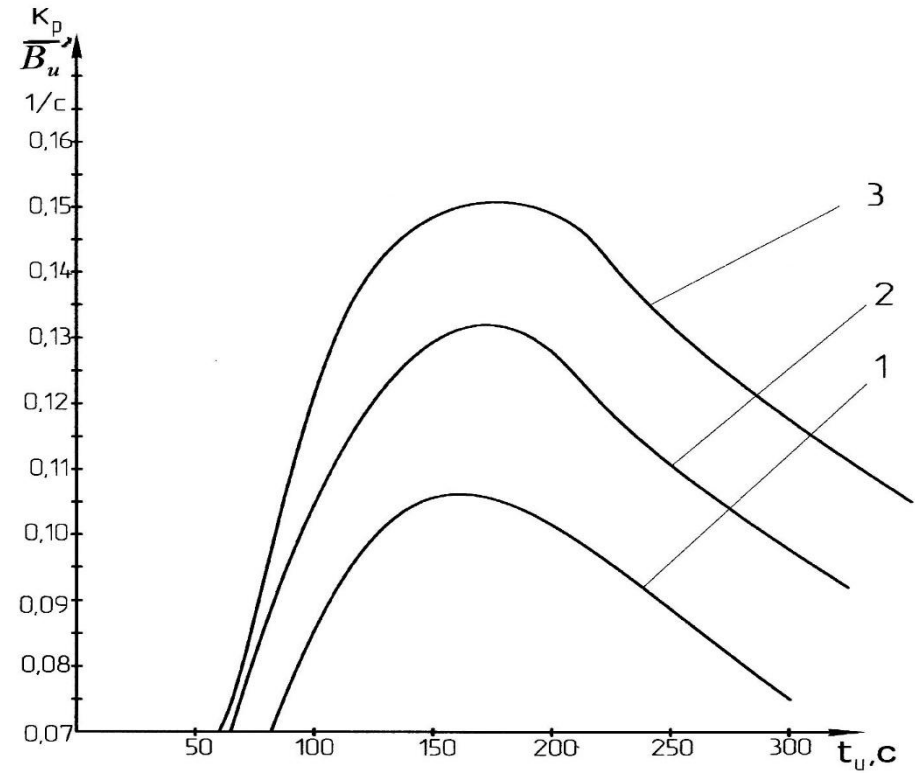
а - с холодильником; б - с подогревателем

а - Pe = 25%; б - Pe = 100%

ГРАНИЦЫ ОБЛАСТЕЙ ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ

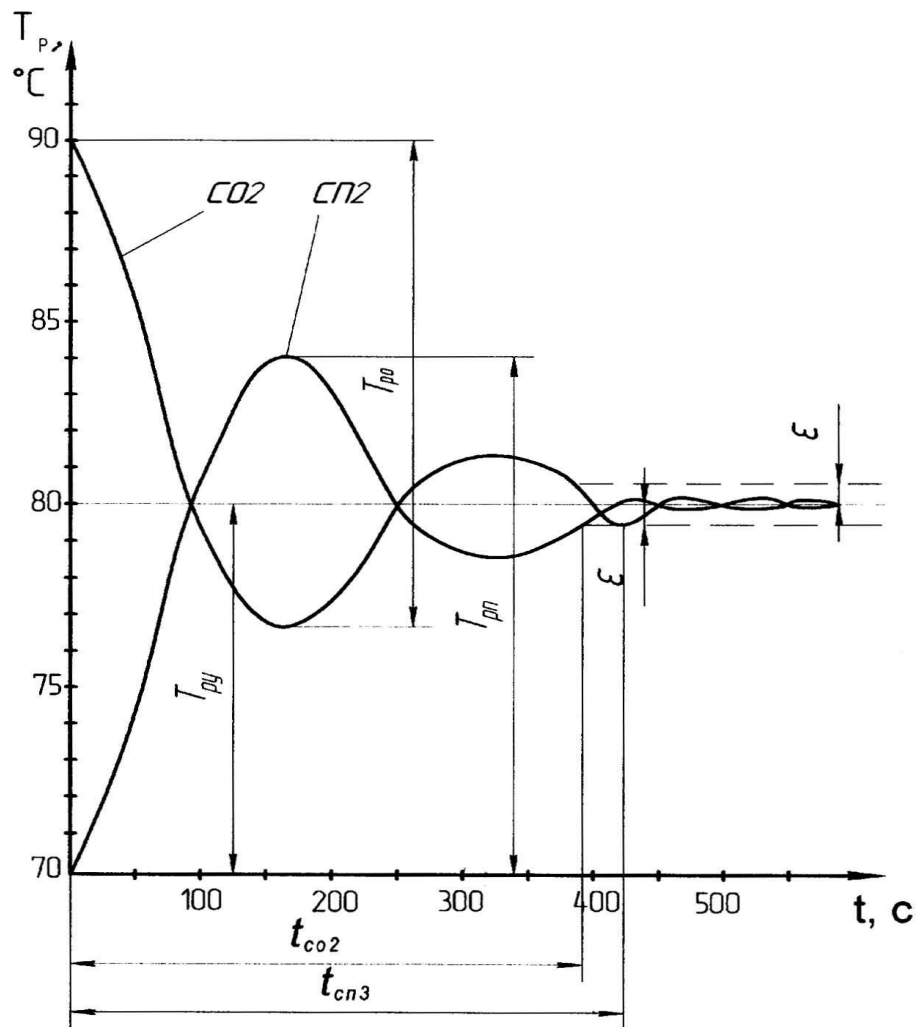


Границы областей запаса устойчивости системы подогрева при различных режимах работы дизеля: 1 – 2 – $P_e = 50\%$; 3 – $P_e = 25\%$; $n = \text{const}$



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

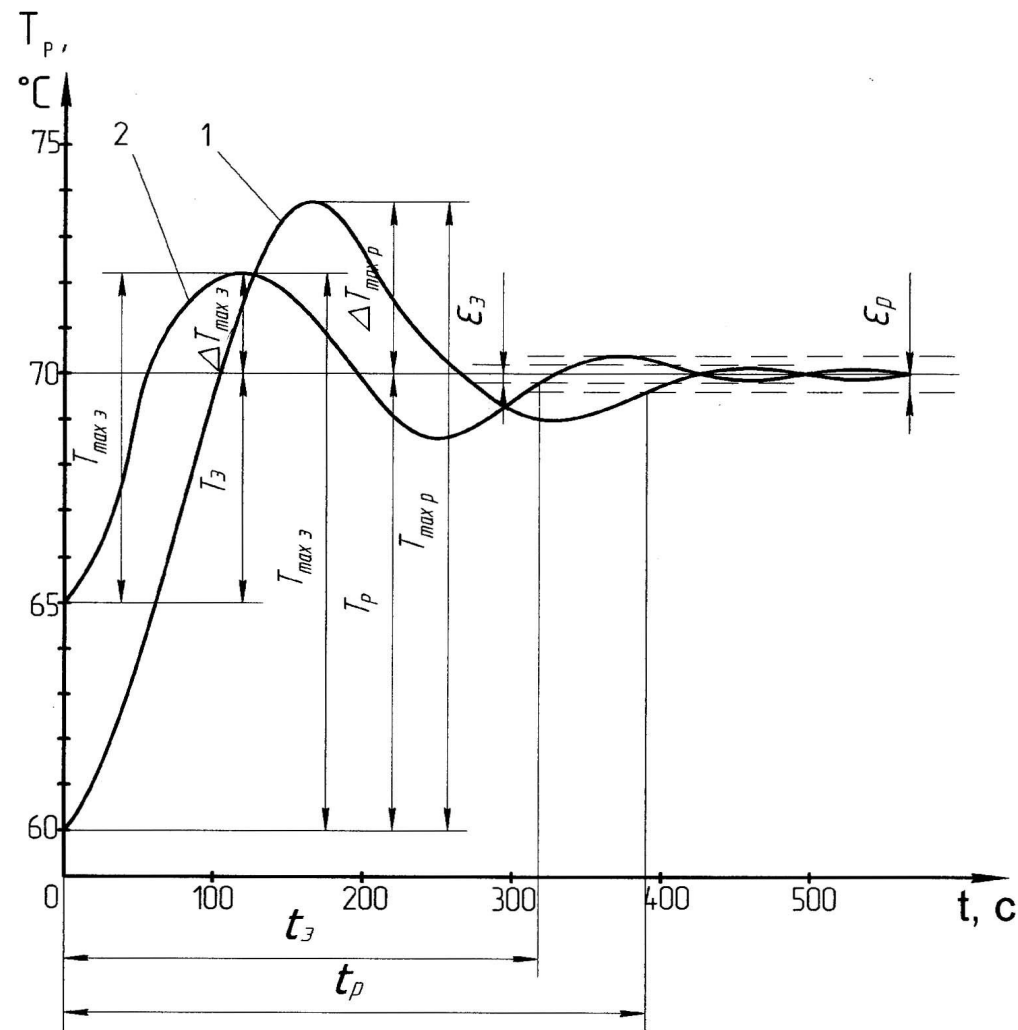
РАСЧЕТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ СПО ПО ЗАДАЮЩЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ДЛЯ УСРЕДНЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ



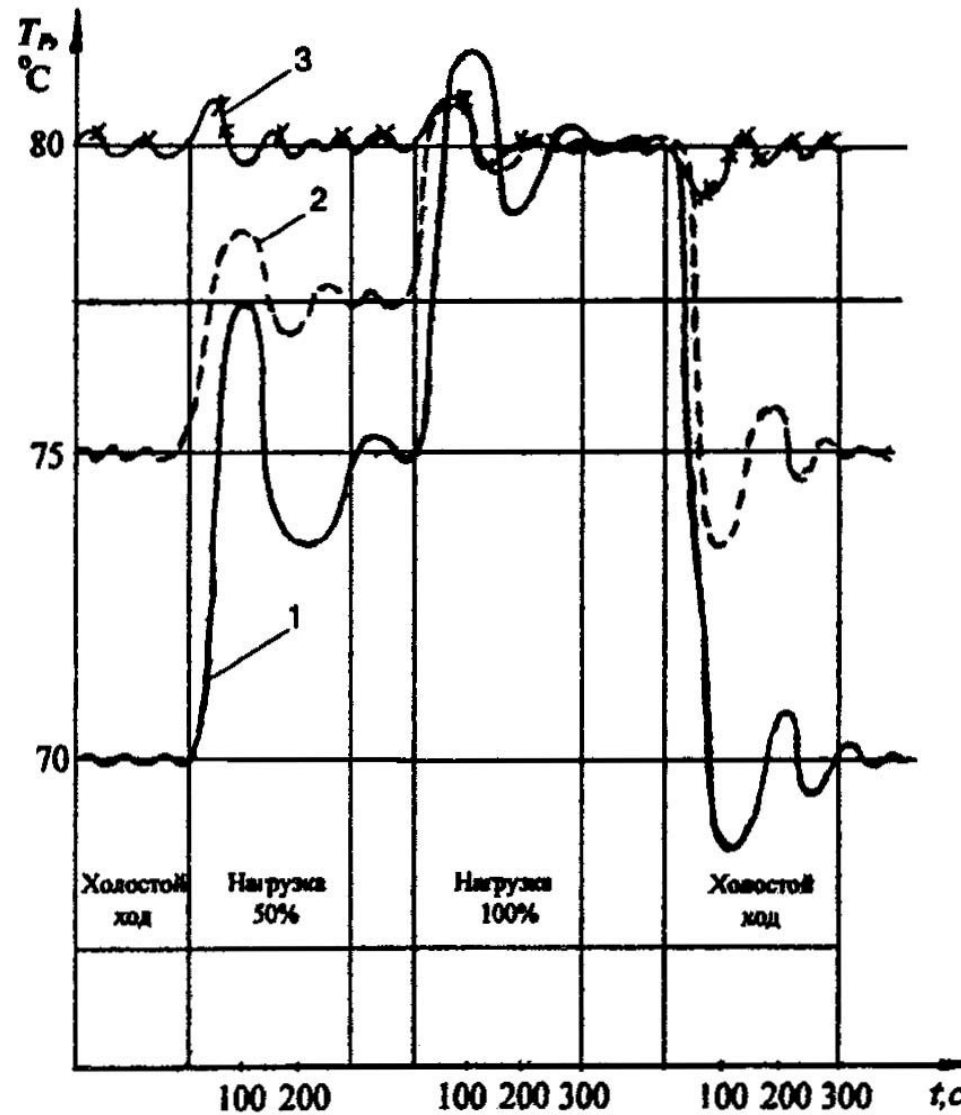
$K_p = 19,25$; $B_u = 144,1$; $P_e = 100 \%$; $n = \text{const}$;
СП2 – система подогрева;
СО2 – система охлаждения

РАСЧЕТНАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ КРИВЫЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СО

32



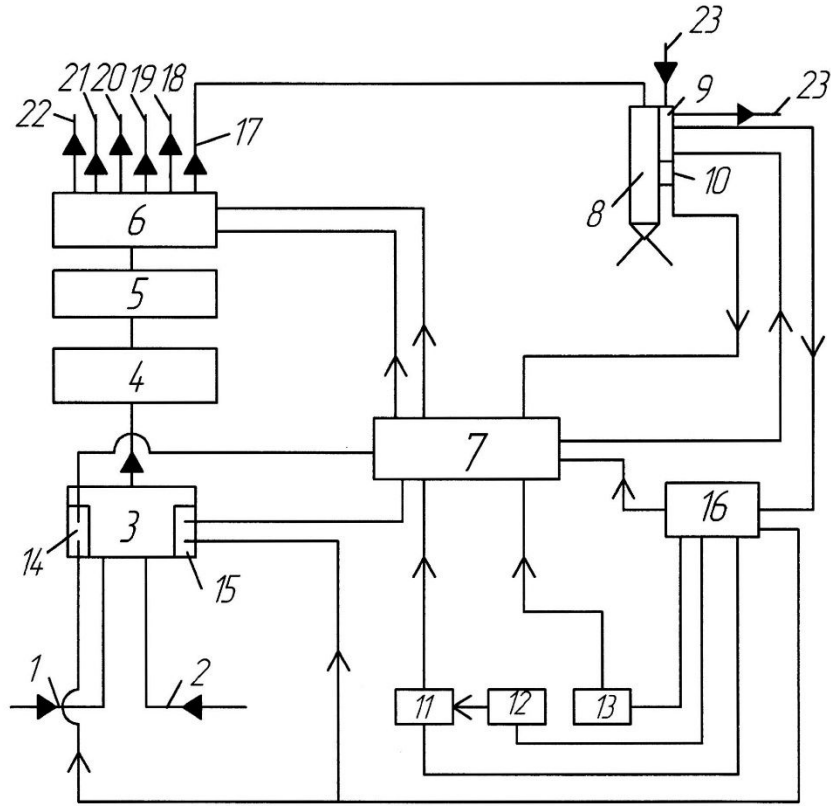
$P_e = 50\%$, 1 – расчетный переходный процесс;
2 – экспериментальный переходный процесс



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

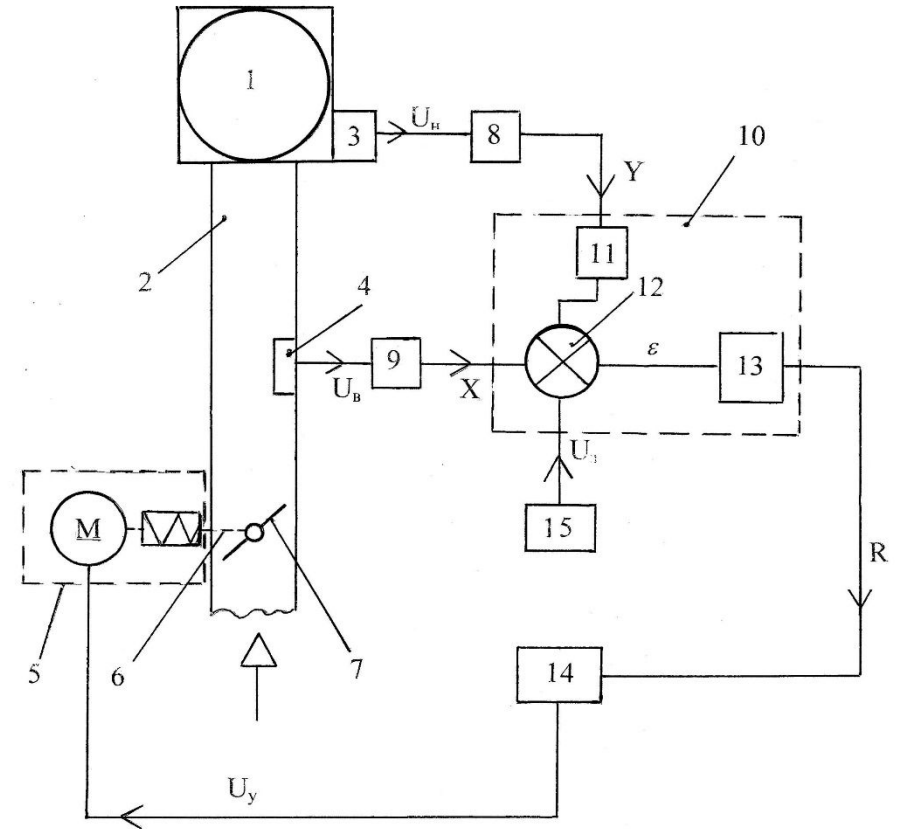
34



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

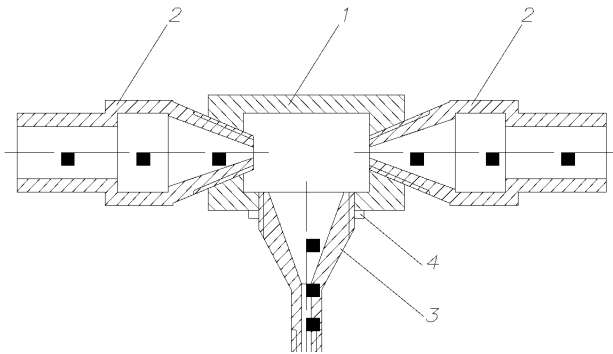
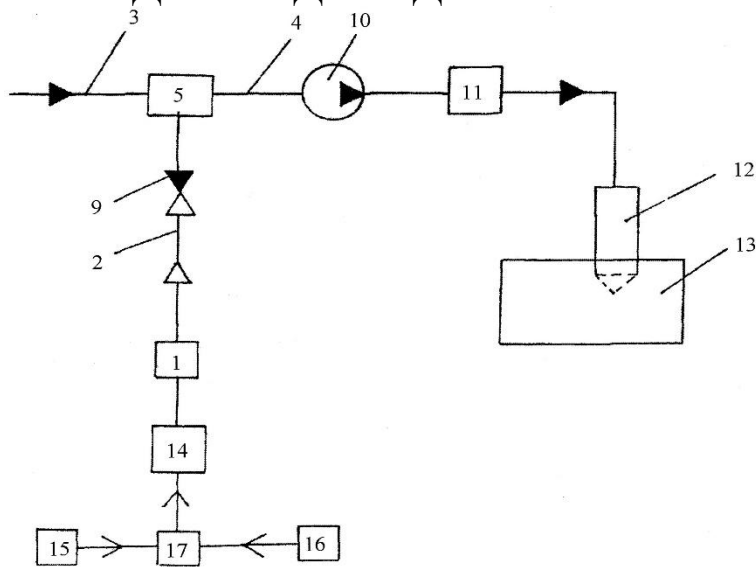
СХЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА

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



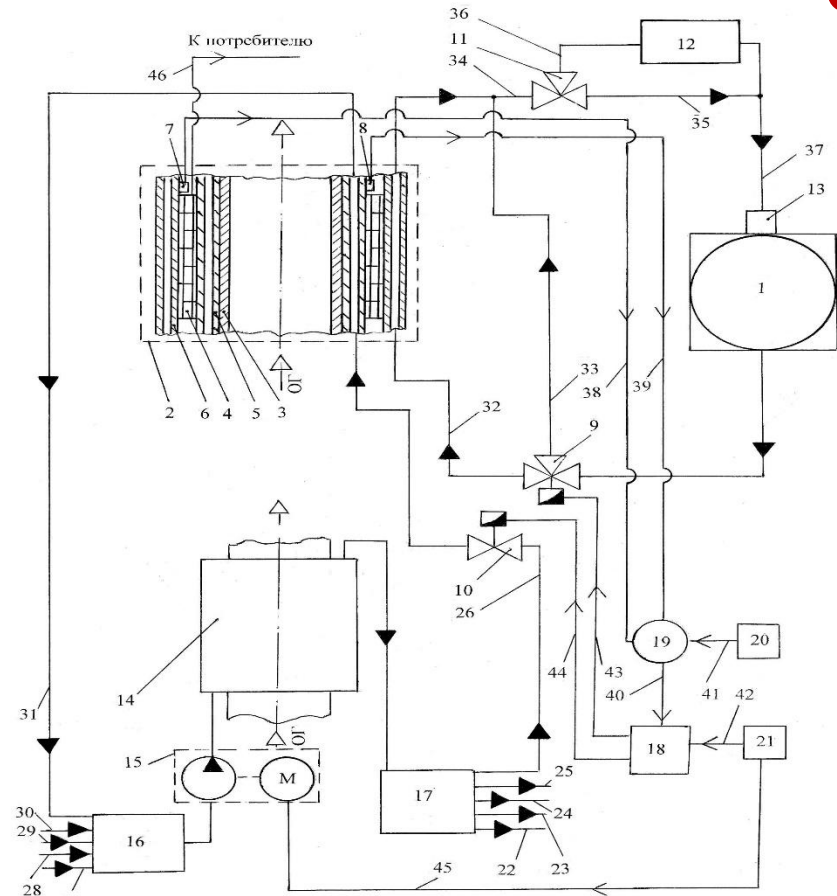
1 – накопительная камера, 2 – канал подачи водорода, 3 – канал подачи топлива, 4 – канал для подачи топлива с водородом, 5 – смешивательная камера, 9 – невозвратный клапан, 10 – топливоподкачивающий насос, 11 – насос высокого давления, 12 – форсунка, 13 – дизель, 14 – электролизер, 15 – датчик нагрузки,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

Смешивательная камера: 1 – камера; 2, 2₁ – 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 – подогревателям 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.