

«

»

«

»

· · · , · · · , · · ·

**АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ГАЗОВЫЕ  
ВИДЫ ТОПЛИВА  
ДЛЯ АВТОТРАКТОРНОЙ  
ТЕХНИКИ**

*Монография*

2025

620.91/98.004.14:621.436.12(035.3)

**Карташевич, А. Н.**

ISBN 978-985-882-742-7. . . . . / . . . . . ,  
., 2025. – 217 . . . . .  
ISBN 978-985-882-742-7.

. 20. . 107. . . . . : 205 . . . . .

10 30 2024 . . . . .

**ISBN 978-985-882-742-7**

© . . . . .  
., 2025 . . . . .  
© . . . . .  
, 2025





## ВВЕДЕНИЕ

, [65, 143]. - -  
[86], 40...80 - -  
, , , , ( ), ” -  
( ). - -  
, - -  
, ), , , „ ( , -  
[3, 82, 111]. , -  
[3, 6, 14, 16, 18, 22, 48, 62, 68, 84, 101, 103, 134]. - -  
- -  
, - -  
[68]. -  
XVIII – XIX ,  
( . ) -  
( . ) ,  
« » ,  
[18]. 1801 .  
, 1861 .  
( )

1856 . , 1872 .

1915–1916 .. ,

1925 .. ,

20 ,

1940 . , [18].

( 50 . <sup>3</sup>) ,

[18].

1939 . -30 -44, 50- -156 -51 ,

1954 . -156 -51 ,

[152]. 60- .

80- . [18].

[59].

[3]. -

[177].

[86, 68].

300  
1800) [111].

Robert Bosch ( ),  
( )

[148],

( )

-245

12

18 [150, 151].

[127],

70...80 [3].

[3, 86, 127].

[18, 54, 68, 86, 120].

## 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

В настоящее время в мире наблюдается тенденция к снижению потребления ископаемых топлив. Это связано с экологическими проблемами, связанными с выбросами парниковых газов и загрязнением окружающей среды. В связи с этим активно ведутся исследования по разработке альтернативных источников энергии и топлив. Одним из перспективных направлений является использование биотоплив, получаемых из возобновляемых источников сырья. Биотоплива обладают рядом преимуществ перед ископаемыми топливами: они являются возобновляемыми, биоразлагаемыми и имеют относительно низкий уровень выбросов парниковых газов при сжигании. Однако существуют и определенные трудности, связанные с производством биотоплива, такие как высокая стоимость сырья и энергии, необходимость использования земель для выращивания сырья и конкуренция с продовольственными культурами. Несмотря на эти трудности, биотоплива рассматриваются как одно из наиболее перспективных направлений развития энергетики в будущем.

[6].

### 1.1. Перспективы применения альтернативных топлив в автотракторных дизелях

В настоящее время в мире наблюдается тенденция к снижению потребления ископаемых топлив. Это связано с экологическими проблемами, связанными с выбросами парниковых газов и загрязнением окружающей среды. В связи с этим активно ведутся исследования по разработке альтернативных источников энергии и топлив. Одним из перспективных направлений является использование биотоплив, получаемых из возобновляемых источников сырья. Биотоплива обладают рядом преимуществ перед ископаемыми топливами: они являются возобновляемыми, биоразлагаемыми и имеют относительно низкий уровень выбросов парниковых газов при сжигании. Однако существуют и определенные трудности, связанные с производством биотоплива, такие как высокая стоимость сырья и энергии, необходимость использования земель для выращивания сырья и конкуренция с продовольственными культурами. Несмотря на эти трудности, биотоплива рассматриваются как одно из наиболее перспективных направлений развития энергетики в будущем.

: , ( ;  
 , . );  
 - ( ). :  
 :  
 - ( ;  
 ), ( ;  
 ).  
 , :  
 ,  
 [6].  
 ,  
 : . . . , . . . . [59, 61, 169, 178].  
 , . . . .  
 , . . . . [6, 62, 85, 86, 88, 104,  
 143, 181].  
 , .  
 [135, 180].

[43].

[131].

75 %

[196, 132, 202, 39].

[76, 85, 195].

[59, 187].

## 1.2. Газовое оборудование для автотракторной техники

2007 . « ( « »). » [3].

« ». 1993 ., « -6» « », .

« -6» , .

« -6» , .

« -6» , .

« » «PeGAS», -

,

,

« » -

:

— ; -

— ; -

— ; -

,

,

— ; -

— ; -

,

,

,

« ».

,

« »

,

,

,

,

« ».

,

,



			« PRINS»	
	300			-
			«Valve Care»	
			«D.T. GAS SYSTEM» -	-
				1992
			«D.T.GAS SYSTEM»	-
			«LANDI RENZO»	-
			«Landi Renzo»	
			ISO 9001.	-
				-
			.T. . S.r.l.	
			«BR G s	-
Equipment»				-
			BRC	-
	30		BRC	-
			«BRC Gas	
Equipment»				
			«LONGAS»	
			1963	-
				-

STAG – «LONGAS» ISO 9001.

STAG (Veltek, Alex, Matrix).

Euro 5. 1–8- , STAG

### 1.3. Системы питания газовым топливом двигателей с искровым зажиганием

– ;

– (1- );

– (2- );

– (3- );

– (3- )

– (4- );

– (4- );

– (5- ).

(1- ) . 1.1

1.1.1. 1- ; 2- ; 3- ; 4- ; 5- ; 6- ; 7- ; 8- ; 9- ; 10- ; 11- ; 12- ; 13- ; 14-

1,6 ( )

, - . -  
9, -

, 4 2 -  
 , 4 - - 6. -  
 - 7 8. -  
 9. -  
 : « », 4; « » -  
 14 « », -  
 . -  
 - . , -  
 . « » -  
 9. -  
 . , -  
 « ». -  
 , . -  
 , -  
 , 2000 -1 .  
 , , -  
 . -  
 « ». -  
 , -  
 ( ) . -  
 5 -  
 . -  
 2 -  
 1. ,



. 1.3.

:1-		;2-	;3-	-	-
	;4-		;5-		;6-
;7-		;8-		;9-	
;10-	;11-		;12-		;13-
	14-				;

. 1.4

(3- )

,

. 1.4.

2- ; 3- ; 1- ; 4- ;  
5- ; 6- ; 7- ;  
8- ; 9- ; 10- ; 11- ;  
12- ; 13- ;  
14- ;  
15-

1.

2,

(

).

5 4 - 7. -

11 10, -

14. 15 12. -

( ) -

( - ). ,

40° - 300-350° .

( = 15,5-15,7).

0,45 ), (

( 2) , -

20

, ( ), -  
 , , -  
 - ( , , -  
 ( , -  
 ). -  
 ( . 1.5) -  
 4 - 7. 10  
 14. -  
 10 ( ). -  
 1 ( . 1.6), 13 -  
 - 7 ( . 1.5) , 14. -  
 - , , -  
 , , -  
 . , -  
 , , -  
 , , -

. 1.5. :  
 1- ; 2- ; 3- -  
 ; 4- ; 5- -  
 ; 6- ; 7- - ; 8- ; 9- - ;  
 10- ; 11- ; 12- ; 13- ; 14- ; 15- ; 16- ; 17-

. 1.6. ( ):  
 1- ; 2-

1:14,7, . . .

> 1  
 1:16,1 ( - ) 1:17,2 ( -  
 ).

13 15.

15 - , ( -  
 ).

11 - ,  
 > 1 , 70  
 ,

13.

35-40 %.

3-

-1.

«KOLTEC»  
MEGI (Multipoint Electronic Gas Injection).

. 1.7

.1.7.  
: 1- ; 2- ; 3- - -  
; 4- ; 5- ;  
6- ,  
; 7- - ; 8- ; 9- -  
; 10- ; 11- -  
; 12- ;  
13- ; 14- ; 15- ;  
16- ;  
:  
1. , ,  
.

2.	,	,	-
3.	,	.	-
4.		-3.	-
5.	,	.	-
		( . 1.8)	-
	,	,	-
		.	-
	,	.	-
		-3,	-
OBD II	EOBD.		-
		,	-
		.	-
		( )	-
	,	.	-
		DGI (Digital Gas Injection) –	-
		,	-
		.	-
		,	-
		,	-
		.	-

. 1.8. ; 1- ; 2- ; 3- -  
; 4- ; 5- ; 6- ;  
10- ; 7- - ; 8- ; 9- ; 11- ; 12- -  
; 13- ; 14- ; 15- -

1,25...1,3 / 2.

-4.

( . 1.9)

5-

DGI (Digital Gas Injection)

19. : ;

1- ; 2- ; 3- ;

4- ; 5- ; 6- - ; 7- ;

8- ; 9- ; 10- ;

11- ;

, , -

, , -

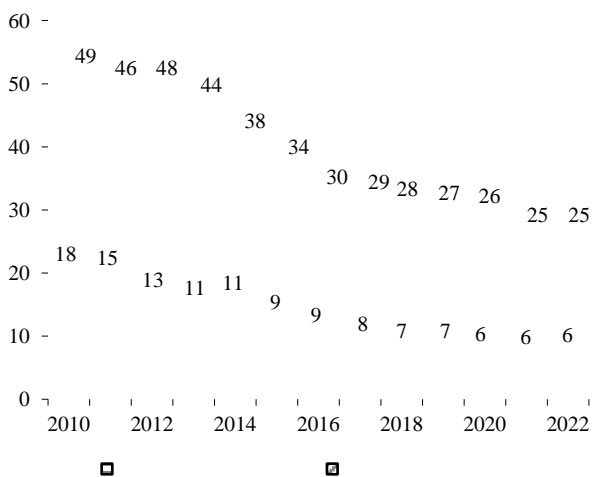
, ( , 700 ° 320...380 °C ).

-



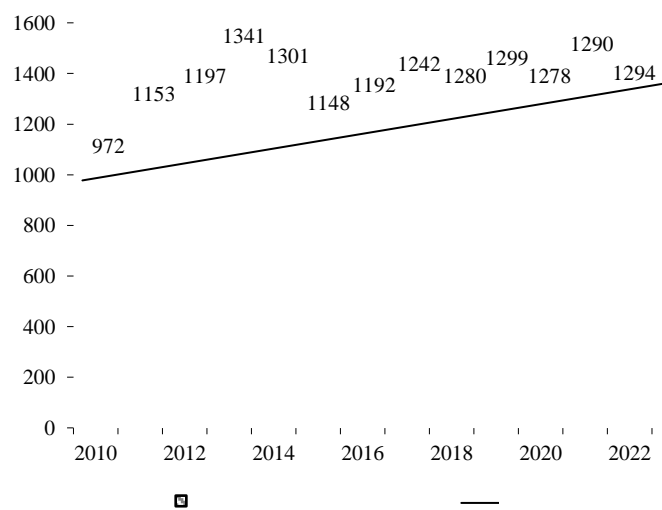
#### 1.4. Использование газовых видов топлив в автотракторных дизелях

80 . [13]. , -  
 , , , , , , -  
 , , , , , . [18]. -  
 , -3309,  
 -5301 « » . -  
 , -  
 , -  
 , [106]. -  
 -  
 ( ) [59]. , ( -  
 ) [59]. -  
 : , , -  
 , . [106]. -  
 28 % 350 . [59]. -  
 , -  
 . -  
 [126]. -  
 . 1.10, 1.11 [170,  
 171].



. 1.10.

( . )



. 1.11.

( . )

. , 2010 , 2020 . -  
 -  
 31,5 %, 66,6 46,9 % -  
 5 %, -  
 - 2 % -  
 [170].  
 ,  
 ( ) [3].  
 ,  
 [152].  
 .  
 , 70- .,  
 ,  
 .  
 1980 .  
 -  
 ( ),  
 ), , ( ) , « » ( -  
 [10, 96]. -  
 ( ) . 1988 , 1993 . -  
 -6 [10, 3]. -

( ) ,  
 [110] ( . 1.12).

.1.12.

[110]

5

( )

[3, 110].

( ),

[42].

70...85 %

[42].

- ( ) . : AFS ( ), GFI, Cummins, Mercedes-Benz ( ), Nippon ( ), VOLVO SKANIA ( ), Woodward, Westport, - ( ) [34, 154].

[110] ( . 1.13).

. 1.13.

( . 1.14)

, ( ) ,  
 2 8 . 20 ,  
 ,  
 , 0,8...1,2 [181].



, [187, 181].  
 , 2600 <sup>-1</sup>.  
 ) ( .  
 , [187, 181].  
 0,45 ,  
 : , ;  
 - ,  
 ( . 1.14) 1987 .  
 -53208,-53217, -53218 -53219 -7409.10 [152,  
 187, 181, 3].  
 .  
 ( . 1.15) , [181, 3].

1- .1.15. ; 2- ; 3- - ;  
 ; 4- ; 5- - ;  
 ; 6- ; 7- - ;  
 8- ; 9- ; 10- - ;  
 ; 11- ; 12- ; 13- - ;  
 ( ; 14- ; 15- - ;  
 ; 16- ; 17- - ;  
 ; 18- ; 19- ; 20- - ;  
 ; 21- ; 22- ;  
 23- ;  
 1,6 .  
 - -  
 0,12...0,13 ( ).

[181, 3].

[181, 10, 3].

Volvo Truck/Bus Corporation.

( . 1.16)

[181, 3].

).

HSV 3000

Servojet ( ),

, [14].

. 1.16.

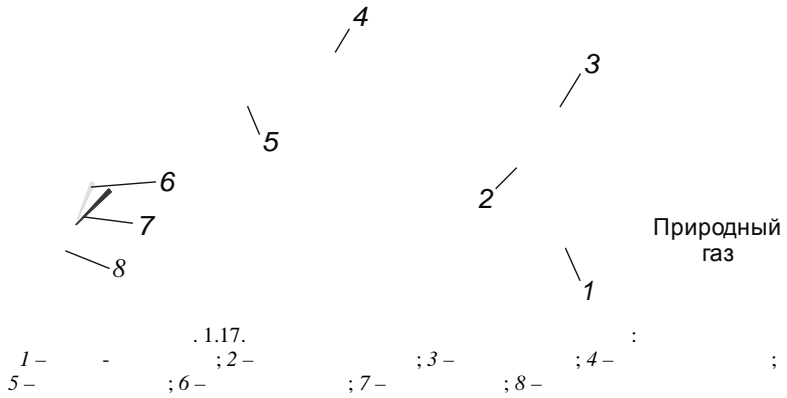
		:1-			-
	;2-			;3-	
			,	,	-
	;4-			;5-	
;6-				;7-	-
;8-				;9-	-
;10-	;11-			;12-	-
;13-		(		);14-	-
16-	;17-			;15-	;
				;18-	-
	;19-		;20-		-
	;21-				

(0,5...0,6 )

,  
 ( ) -  
 , . -  
 , . -  
 , -  
 -  
 [14, 181, 3].  
 :  
 -  
 ( 80 %);  
 -  
 ;  
 ( + );  
 -  
 ;  
 -  
 .  
 , , :  
 -  
 ;  
 -  
 ;  
 -  
 ( ) HSV3000 Servojet ( ), « -  
 », Barber Colman ( )  
 [14, 181, 3].  
 AFS ( ) -  
 Eagle -  
 [14, 34].  
 Westport ( ) ,  
 ( . 1.17).

30 , -  
 . , -

[181, 3]. N<sub>x</sub>



- ;  
 -  
 - ( )  
 EURO-2, ;  
 - ( 85...90 %)  
 [34].

, , [15, 181, 3].  
 [3]

( 200 -  
 ). 30 .  
 - :  
 - ;  
 - ;  
 - 40 % N<sub>x</sub> ;  
 - 75 %  
 ( 2 25 % ( ) );  
 - )  
 ( , , )  
 , ( )  
 ,

[3].

## 1.5. Физико-химические свойства газовых топлив

1.1–1.3 [7].  
[59, 18].

### 1.1. Показатели качества газообразных углеводородов [59]

	, / <sup>3</sup>	, °	, / <sup>3</sup>	*
	0,554	-82,1	35,8	120
	1,138	32,3	63,7	116,3
	1,453	91,6	86	102,6
	1,523	95,7	91,2	111,6
	1,937	144,0	113,5	91,4
-	2,007	152,8	118,6	95,8
	2,007	137,0	118,6	102,1

\*

1.1

( , , ),

[83].

*Природный газ* –

(101,325 20 ° )

(CH<sub>4</sub>) – 98 %.

– : (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>),  
(H<sub>2</sub>S), ( ), (N<sub>2</sub>), ( ).

, , - -  
 ( ) 27577-2000 ( -  
 , , Compressed natural gas CNG) - -  
 ,  
 ( )  
 (82-98 %)  
 ( 6 %), ( 1,5 %) ( 1 %).  
 ( $Q = 23-37,7$  /  $^3$ ), ( $Q = 15-23$  /  $^3$ )  
 ( $Q = 4,2-15$  /  $^3$ ).  
 ; - , -  
 ; - , -  
 -  
 ( )  
 , , - -  
 -  
 12.1.005-76 4. -  
 300 /  $^3$  ( ). -  
 ( , , ). -  
 ( , 0,55). , -  
 , -  
 -  
 -





4, 15...40 %  $H_2$ , 0...1 %  $H_2S$ , 0...1 %  $N_2$ , 0...1 %  $O_2$  : 55...80 %

10 %

20...40

(95...98 % )

$NO_x$

80 100 %

*Водородное топливо:*

$H_2$  [6, 86],

[186].

415...630 °C , , - ( - ) , -

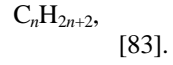
**1.2. Сравнение газа с другими видами топлива по физико-химическим свойствам**

-		-				-	
	-	-	-	-	-		-
-	100...105	200...300	32	46	44	16	2
, %:	85...88	84...87	39,5	52,2	82	75	0
	12...15	13...16	12,6	13,1	18	25	100
	0	0	49,9	34,7	0	0	0
/ 3	0,72...0,78	0,81...0,89	0,796	0,796	0,504	0,424	0,07
- , °C	27...225	190...345	68	78	-2	-161	-252
- , °C	-40	-34	-97,5	-114	-187	-183	-260

. 1.2  
-180 °C,

) - 300 / 3, ( - )  
- 100 / 3 [32].  
( ) ( . Liquefied petroleum gas (LPG)  
( ) -

-50 0 °C. -



[33]

$$Q = 33210Q_C + 109060Q, \quad (1.1)$$

$Q_C -$   
 $Q -$

[33].

27578-87

. 1.3 [35, 59, 83].  
20448-88 [36]

; - ( . 1.4).  
 , 75 % , -  
 - 60 % ( , , , . )  
 [83, 59].

1.3. - [141]

	27578-87		
1. , %:			6,33 0,38 5,95
	85 ± 10	50 ± 10	50,54
2. 4 :			43,13 13,03 29,74 0,36
3. : +45° , -20° , -35° ,	- - 0,07	1,6 0,07 -	1,6 0,29
4. / <sup>3</sup> °			514 20

**1.4. Основные нормативные показатели сжиженных газов разных марок [36]**

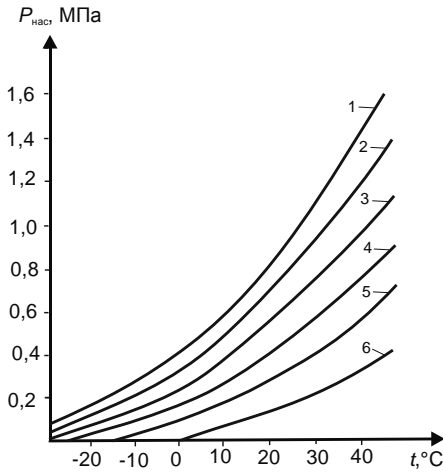
, %:	4	6	6
, ,	75	-	-
:	-	-	60
-	-	60	-
( 20° , % , - 5 )	1	2	2
: +45° , -20° ,	1,6 0,16	1,6 -	1,6 -
-	0,015	0,015	0,015
, %,	0,003	0,003	0,003

. 1.18

$t$  [33].

$P$

0,1

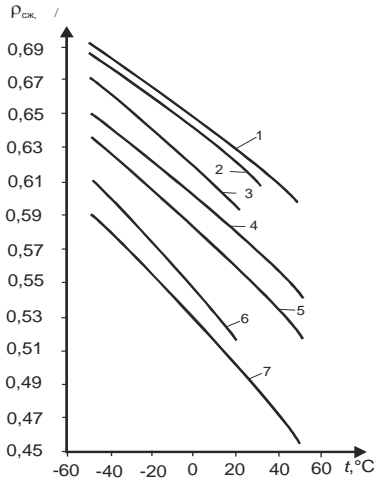


. 1.18.

- |     |        |       |
|-----|--------|-------|
| 1 - | 80 % + | 20 %; |
| 2 - | 60 % + | 40 %; |
| 3 - | 40 % + | 60 %; |
| 4 - | 20 % + | 80 %; |
| 5 - |        |       |
| 6 - |        |       |

0,45...0,65 / ( . 1.18).

1.19  
 $p$  -10° 0,54 / , 30° 0,48 / .  
 11 % .  
 10 %



1.19.  
 1- ; 2- ; 3- ;  
 4- ; 5- ;  
 6- ; 7-

0,7  
 [32].

100

: 2,5

0,4...0,5 %

20 % [33].

1.5 [152].

**1.5. Основные физико-химические свойства отдельных составляющих сжиженных газов**

	(C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )	(C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	(C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	(C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> )
/	42,08	44,10	58,12	114,5
0,1 15 °	0,522	0,509	0,582	0,720
0,1 0 °	1,915	2,019	2,703	5,08
(1)	1,481	1,562	2,091	3,940
, °	-47,7	-41,5	-0,50	>33,0
1, °	0,287	0,269	0,235	0,148
/	45,650	45,970	45,440	44,000
, °	475...550	510...580	475...550	470...530
, %:	2,00	2,4	1,80	1,50
	11,1	9,5	8,40	6,0

15 °

(+10...+40 ° ) [152].

[9].

### 1.6. Особенности сгорания газовых топлив

2 2 , , 70 %.  
(65...75 %) 30 % [76].

2, 3, 2, 4,  $nH_m$ ,  $nH_mO$ , NO, NO<sub>2</sub>, N, N<sub>2</sub>,  
NH<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>, HCN, H, H<sub>2</sub>, OH, H<sub>2</sub>O [66].

(76...78 % )

( $\alpha > 1$ )

:

$$3 \cdot 8 + 5 \cdot 2 \rightarrow 3 \cdot 2 + 4 \cdot 2 + Q, \quad (1.2)$$

$$4 \cdot 10 + 6,5 \cdot 2 \rightarrow 4 \cdot 2 + 5 \cdot 2 + Q_2,$$

$$\begin{aligned} Q_1, Q_2 - \\ Q_2 = 45,75 \end{aligned}$$

$$Q_1 = 50,54 \quad / ;$$

$$(\alpha < 1)$$

$$2 \cdot 3 \cdot 8 + 7 \cdot 2 \rightarrow 6 \cdot 2 + 8 \cdot 2 ,$$

$$3 \cdot 8 + 2 \cdot 2 \rightarrow 3 \cdot 2 + 4 \cdot 2 , \quad (1.3)$$

$$2 \cdot 4 \cdot 10 + 9 \cdot 2 \rightarrow 8 \cdot 2 + 10 \cdot 2 ,$$

$$2 \cdot 4 \cdot 10 + 5 \cdot 2 \rightarrow 8 \cdot 2 + 10 \cdot 2 .$$

$$(3 \cdot 8)$$

5

$$(4 \cdot 10) - 6,5$$

21,0 %.

1<sup>3</sup>

24<sup>3</sup>

31<sup>3</sup>.

( )

8,4...9,9 %

- 1,8...2,4 %.

[76].

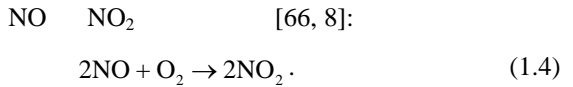
[107].

(  $T_{max}$  1800 )

NO

90 % [8].

)  
 « » (« »)  
 NO [66].



1,3...2,6,

, . . . [66].

.) [66].

[167].

. [190].

, , , , .  
 , . . . ( ).  
 ,  
 -  
 ,  
 ,  
 .  
 [66]:  

$${}_n\text{H}_m \rightarrow n\text{C} + 0,5m\text{H}_2, \quad (1.5)$$
 ,  
 $n, m -$   
 / ,  
 ,  
 [190],  
 5,0...7,0 650...750 °  
 ,  
 -  
 ( 1500 )  
 .  
 2000 ,  
 3000 - [66, 199].  
 - 900 ° .  
 ,  
 .  
 ge.





-32054-12, -5301 « », -

80...85 % 15...20 % -

, 9,7 %, 96 %, -

- 8 % - 1,2 , 20 . -

[40]

-238 -740

7...27 % -

11...21 %, 20...50 ° , -

50...70 %, 130...150 <sup>-1</sup> .

10° . . .

[148]

4 11,0/12,5 ( -245.12 ), 80...85 % -

15...20 % , ,  $g_e$  -

( $p < 0,5$  ),

$g_e$  1...10 % (  $p =$

= 0,84 ,  $g_e = 195 /$  ), 0,38

0,4. ,

$NO_x$  1,06...1,53 , ,

18...25 , 1,2 , -

20 [148].

. . .

( -240) , 4 11,0/12,5

2,51 / -

8,91 / [54]. , -

23 -

. . . « » .

0,35 ( 2,0 0,3 , *Bosch*). 80 %.

*n m*

[99]

236 ,

18...20 %

(

,

).

, *EURO-2*,

, *EURO-3*.

[148, 42, 54],

1.

20...50 ° .

2.

,  $\alpha$

3.

15...18 %

1...3 . . .

[148]

4.

20...40 %,

5. 1,05...1,2 / 10...15 %, ( -240, -245,7, -245,9, -245.12 ), 42...96 %

11...42 %, 80...85 % [101].

[188]. 2 8,5/11,

- 1987 . [188].

( 20...25 %

3,3 , n m - 12,5 [70].

«Ikarus» RABA-MAN

- 25 % [70]. « - » n m 2,4

40 %, n m - 70 %.

NO<sub>x</sub>.

( , 16° ,

49 [70]. . . . . « »  
 , 640 , -160,  
 12 . -  
 . -700 -  
 . 5 % 20 %,  
 18...20 % [63].  
*Robert Bosch GmbH* -  
 2006 . 2012 . -  
 6- 7,2 ,  
 160 2200 <sup>-1</sup>,  
 (*Common Rail System*),  
 (2 ), -  
 . -  
 90 %, ESC-  
 0,9 , [12]. -  
 80 %, 2 – 16 % NO<sub>x</sub> ( 1,5 %).  
 . -  
 3LGDT, -243, -245.7, -245.9, -260, -260.1), (MMZ-  
 30 % 70 % [130].

**1.8. Автотракторная дизельная техника, оборудованная системой подачи газа**

« » -  
 ( . 1.20–1.23).

. 1.20. « -320.4 » . 1.21. « -92 »

« . 1.22. -82.1» . 1.23. « -1221.2»

,  
-  
-  
. 1.24-1.31.

. 1.24.  
7

. 1.25. 85

. 1.26. Fendt 824 Vario

. 1.27. Valtra Dual Fuel

. 1.28.  
DFH4180

DONGFENG

. 1.29.  
1945

-

. 1.30. Next 3010 GD

. 1.31.  
SX331863366

SHACMAN 8×4

## 1.9. Выводы по главе 1

1

1.

... ( ... ) ... -  
... - ) ... , ... -

2.

... ,  
... ,

3.

... ,  
... ,  
... ,  
... ,  
... ,

4.

... ,  
... ,  
... ,

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ПИТАНИЯ ДИЗЕЛЯ

[9, 32, 34, 40, 54, 99, 185, 148, 152, 181] -

· -

· -

· -

, -

· -

·, -

· -

, -

, -

, -

, -

, [10]. -

, -

, -

, -

- -

· -

, -

15...30 %

[99]. -

, -

, -

, -

, -

· -

· -

[99].

[99].

[15].

[15].

[192, 191].

( . 2.1),

[3].

[7].

-  
-  
-  
-  
-

.2.1.

1-

;2-  
4-

;3-

;

:

( )

-  
-  
-

[7].

-  
-

## 2.1. Теоретическое обоснование способа подачи газового топлива в дизель с наддувом

В дизельных двигателях с наддувом подача топлива осуществляется в виде жидкого топлива, которое впрыскивается в камеру сгорания. При этом топливо смешивается с наддувочным воздухом, что способствует более полному сгоранию. Однако при этом возникает проблема с подачей топлива, так как топливо должно быть подано в камеру сгорания в определенное время и в определенном количестве. Для решения этой проблемы используются различные способы подачи топлива, в том числе и подача топлива в виде газа.

Подача топлива в виде газа осуществляется следующим образом: топливо подается в камеру сгорания в виде газа, который смешивается с наддувочным воздухом. При этом топливо подается в камеру сгорания в виде газа, который смешивается с наддувочным воздухом. При этом топливо подается в камеру сгорания в виде газа, который смешивается с наддувочным воздухом.

[164]

( 2.2).

( ): 50 %

);

50 % ).

:

( );

, ( );

( ,

).

:

;

;

.

:

( , );

( );

;

.

:

;

( )

:

- ;  
- [172, 110, 163].

- « [163]. »

« » « ».  
( . 2.2, a)  
[163].

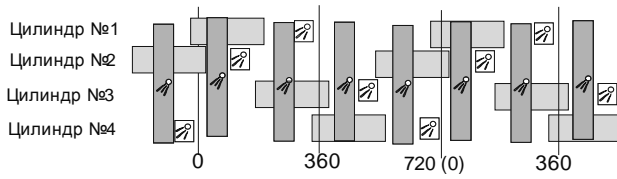
(« »)  
( . 2.2, б, в, г)

( . 2.2, б) ( )  
( )  
( ),

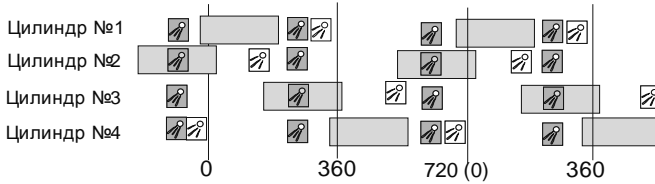
, , ,  
,  
,  
,  
( . 2.2, в),

( - ) ( . 2.2, г)

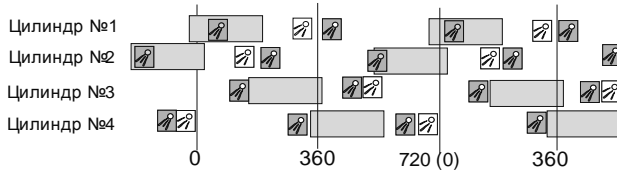
- ,  
-  
-  
-



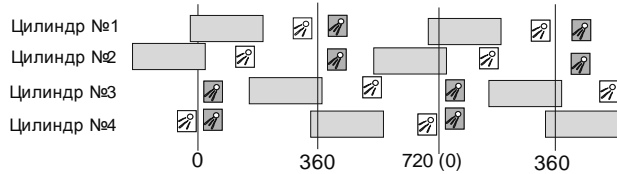
*a*



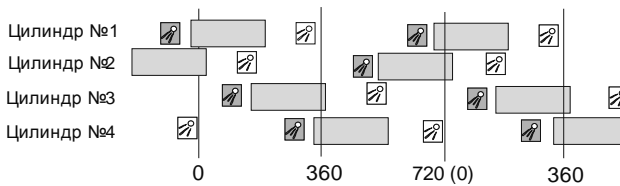
*б*



*в*

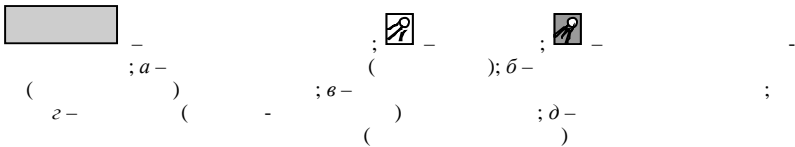


*г*



*д*

. 2.2.



«...»,

(... 2.2, d)

[110, 190].

[163].

30 (

(0,1...5 ) [181, 3].

;

«...»

[181, 3],

[106, 193, 155],

## 2.2. Определение состава смеси для работы дизеля с добавками газового топлива

,  
 ,  
 [3, 82].  
 ( , )  
 ( <sup>3</sup> ).

$$+ + = 1, \quad (2.1)$$

, - ,  
 :  
 = 0,86; = 0,14; = 0.  
 :  
 $\Sigma n_m r + N_2 = 1, \quad (2.2)$

$C_n H_m O_r - 1$  ;  $1^3$   
 $N_2 -$  .  
 :  
 = 0,822; = 0,178; = 0.

:  
 ( ).  
 23,2 %, - 20,8 % .  
 1

$$l_o = \frac{1}{0,232} \left( \frac{8}{3} C + 8H - O \right). \quad (2.3)$$

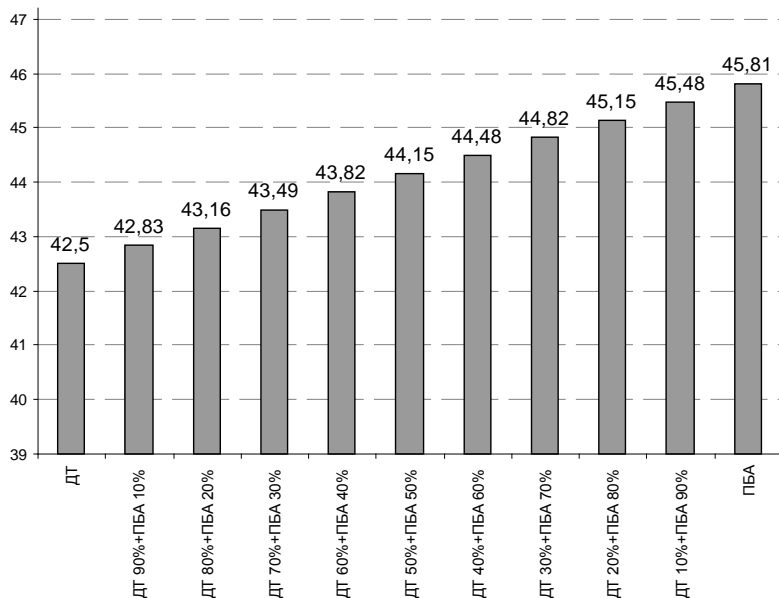


$H_{и} -$  , / ;  
 $H_{и} -$  , / .

### 2.1. Расчетные показатели теплоты сгорания СУГ марки ПБА [141]

		$( t = 20^{\circ} , P = 0,1 )$	%	H ,	
	4	0,0025	0,38	50	0,190
	2 6	26,54	5,95	42	2,499
	3 8	253,71	50,54	46,35	23,425
	4 10	171,90	29,74	45,75	13,606
	( 3)3	75,31	13,03	45,75	5,961
	3( 2)3 3	2,25	0,36	35	0,126
...		529,7	100		45,81

$H_{и}$ , МДж/кг



. 2.3.

$$\frac{dm}{d\varphi} = \frac{dm}{d\varphi} + \frac{dm}{d\varphi}, \quad (2.6)$$

$$\frac{dQ_X}{d\varphi} = \frac{dm}{d\varphi} (H_u + H_u), \quad (2.7)$$

$$\frac{dU}{d\varphi} = \frac{dQ}{d\varphi} - \frac{dL}{d\varphi}, \quad (2.8)$$

$$\frac{dQ}{d\varphi} = \dots, \quad / \quad ;$$

$$\frac{dQ}{d\varphi} = \frac{dQ_X}{d\varphi} - \frac{dQ_W}{d\varphi}, \quad (2.9)$$

$$\frac{dQ_W}{d\varphi} = \dots, \quad / \quad ;$$

$$\frac{dQ_W}{d\varphi} = \frac{\alpha_m \left( \pi D_n \left( \frac{D_n}{4} + R \right) \left[ (1 - \cos\varphi) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) - k\lambda \sin\varphi \right] + F \right)}{6n} (T_{\max} - T_W), \quad (2.10)$$

$$\alpha_m = \dots, \quad / ( \cdot^2 \cdot \mathbf{K} );$$

$$\pi = \dots ;$$

$$D_n = \dots, \quad ;$$

$$R = \dots, \quad ;$$

$$\varphi = \dots, \quad ;$$

$$\lambda = \dots ;$$

$$k = \dots ;$$

$$F = \dots, \quad \frac{2}{-1};$$

$$n = \dots, \quad ;$$

$$T_{\max} = \dots, \quad ;$$

$$T_W = \dots, \quad ;$$

$$\frac{dL}{d\varphi} = \dots, \quad / \quad ;$$

$$\frac{dL}{d\varphi} = P \frac{dV}{d\varphi}, \quad (2.11)$$

$$P = \dots, \quad ;$$

$$\frac{dV}{d\varphi} = \dots, \quad 3;$$

$$\frac{dV}{d\varphi} = \frac{\pi^2 D_n^2 n R}{2} \left( \sin\varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi - k\lambda \cos\varphi \right). \quad (2.12)$$

$$(2.8) \quad (2.9) \quad , \quad ;$$

$$\frac{dQ_X}{d\varphi} = \frac{dU}{d\varphi} + \frac{dQ_W}{d\varphi} + \frac{dL}{d\varphi}. \quad (2.13)$$

[203].

$$(2.7) \quad \frac{d^2 Q_X}{d\varphi^2} = 0.$$

$$(2.14) \quad \frac{d^2 m}{d\varphi^2} (H_u + H_u) = 0.$$

$$\frac{d^2 m}{d\varphi^2} = 0. \quad (2.6):$$

$$(2.15) \quad \frac{d^2 m}{d\varphi^2} + \frac{d^2 m}{d\varphi^2} = 0.$$

$$\frac{dm_{\text{БП}}}{d\varphi} = 0 \quad \frac{d^2 m_{\text{БП}}}{d\varphi^2} = 0, \quad \frac{d^2 m_{\text{БПП}}}{d\varphi^2} = 0.$$

66]

[68].  
[7, 25, 65,

$$(2.16) \quad = \frac{l}{l_0} = \frac{L}{L_0},$$

$$\begin{aligned}
 l - & 1 \quad ( \quad / \quad ); \\
 L - & 1 \quad ( \quad / \quad ); \\
 l_0 - & 1 \quad ( \quad / \quad ); \\
 L_0 - & 1 \quad ( \quad / \quad ) [111].
 \end{aligned}$$

$$42,50 \quad / \quad (2.5),$$

. 2.2.

### 2.2. Расчет количества ДТ при заданном количестве СУГ

	, %
100	–
89,22	10
78,45	20
67,66	30
56,88	40
46,11	50
35,33	60
24,55	70
13,78	80
2,99	90
–	92,77

:

$$l_0 = \mu L_0, \quad (2.17)$$

$$\mu - \quad (\mu = 28,96 \quad / \quad ) [111].$$

$$2,4 \%, \quad - 8,4 \% [3, 82].$$

( $\alpha$ ),

$$(\alpha_{\min}) \quad (\alpha_{\max})$$

$$0,35 \dots 1,7$$

$$- 0,6 \dots 2,0 [67].$$

$$\alpha = 1,2 \dots 2,0,$$

$$\alpha = 0,84 \dots 0,95$$

[6],

$$\alpha = 1, 0 \dots 2, 0.$$

,  
 ,  
 [3].  
 ,  
 [7].  
 $\alpha > 1$

$$Q = \frac{H_u}{M_1}, \quad (2.18)$$

$H_u -$   
 $M_1 -$   
 $3 ( / )$ ;  
 $( / )$ .  
 ,  
 1

$$M_1 = L_0 + \frac{1}{m_T}, \quad (2.19)$$

$m_T -$   
 $1/m_T$   
 [111].

$$Q = \frac{H_u}{L_0}.$$

( )  $M_1$ ,  
 $M_r$  . . .  
 $\alpha > 1 ( / )$

$$Q = \frac{H_u}{M_1 + M_r} = \frac{H_u}{[M_1(1+r)]} = \frac{H_u}{[L_0(1+r)]}, \quad (2.20)$$

$M_r$  – , ;  
 $\gamma_r$  – , ;  
 $\gamma_r = 0,03 \dots 0,04$  [76].

$$r = \frac{M_r}{M_1}. \quad (2.21)$$

$\alpha > 1$  ( / )

$$Q = \frac{H_{uH}}{[l_0(1+r)]}. \quad (2.22)$$

( . 2.3).

### 2.3. Теплота сгорания рабочей смеси в зависимости от $\alpha$

	, / .										
	( )										
	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
	81,73	74,30	68,11	62,87	58,38	54,49	51,08	48,08	45,41	43,02	40,87
90 % + 10 %	81,87	74,43	68,23	62,98	58,48	54,58	51,17	48,16	45,49	43,09	40,94
80 % + 20 %	82,01	74,55	68,34	63,08	58,58	54,67	51,25	48,24	45,56	43,17	41,01
70 % + 30 %	82,15	74,68	68,46	63,19	58,68	54,77	51,34	48,32	45,64	43,24	41,08
60 % + 40 %	82,29	74,80	68,57	63,30	58,78	54,86	51,43	48,40	45,72	43,31	41,15
50 % + 50 %	82,43	74,93	68,69	63,41	58,88	54,95	51,52	48,49	45,80	43,39	41,22
40 % + 60 %	82,56	75,06	68,80	63,51	58,97	55,04	51,60	48,57	45,87	43,46	41,28
30 % + 70 %	82,70	75,18	68,92	63,62	59,07	55,13	51,69	48,65	45,95	43,53	41,35
20 % + 80 %	82,84	75,31	69,03	63,73	59,17	55,23	51,78	48,73	46,03	43,60	41,42
10 % + 90 %	82,98	75,43	69,15	63,83	59,27	55,32	51,86	48,81	46,10	43,68	41,49
	83,12	75,56	69,26	63,94	59,37	55,41	51,95	48,89	46,18	43,75	41,56

, . 2.3, , -

0,15...1,54 %  
(2.12) , .

[82]. -

, -

. 2.4.

. 2.4.

, = 1,3...1,7 [82]. -

## 2.3. Влияние применения сжиженного нефтяного газа на регулировку, рабочий процесс и тепловыделение тракторного дизеля

[141, 82]

4 11,0/12,5 ( -245.5S2).

[93, 94],

(85 % + 15 %

70 % + 30 %

( )

)

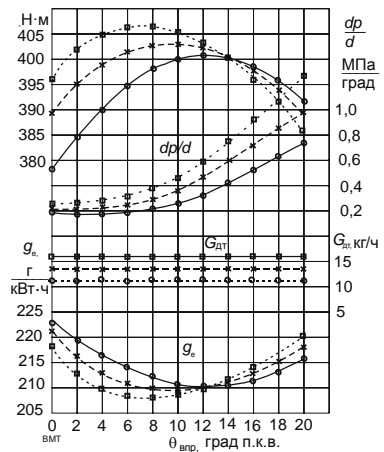
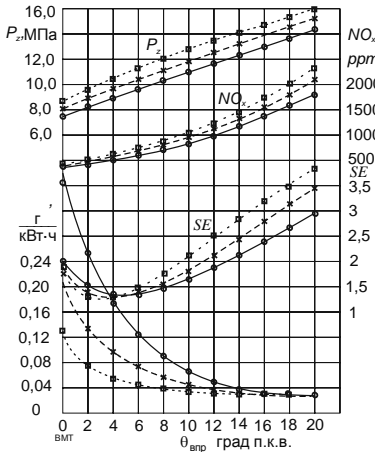
[151].

Microsoft Excel,  
Corel Draw.

. 2.5

1800

-1.



○ — ; × — × — 85 % + 15 % ; □ — □ — 70 % + 30 %

. 2.5.

4 11,0/12,5 ( -245.5S2)

1800

-1

$$\theta = 12,2^\circ,$$

$$g_{e \min} = 210 / \dots$$

( )

(M)

(ge).

(G)

( )

Stage II.

(NO<sub>x</sub>)

(

– PM) [111],

PM

n = 1800

-1

$$\theta = 16 \dots 20^\circ,$$

(P<sub>z</sub>), NO<sub>x</sub>

(dp/dφ).

$$n = 1800$$

-1

$$\theta = 0 \dots 2^\circ$$

PM.

PM

NO<sub>x</sub> (SE)

[146]:

$$SE = C_{pm} (PM / 0,15) + C_{no} (NO_x / 7),$$

(2.23)

C<sub>pm</sub> –

(0,5);

C<sub>no</sub> –

(1,0);

PM –

;

NO<sub>x</sub> –

NO<sub>x</sub> PM

2.5

$$\theta = 4 \dots 8^\circ$$

M<sub>max</sub>

$$\theta = 12^\circ,$$

$$\theta_{\text{ВНП}}^{\text{опт}} = 4 \pm 1^\circ,$$

$$- \quad ( \quad ) \theta = 4 \pm 0,5^\circ \quad -$$

[151].

$$(PM), \quad (NO_x), \quad (g_e),$$

$$(SE) \quad -$$

:

$$g_e = 8,37 \cdot 10^{-5} \cdot \quad - 0,00204 \cdot \quad + 0,22246, / \quad \cdot, \quad (2.24)$$

$$PM = 0,2719 \cdot \quad -0,215 \cdot, / \quad \cdot, \quad (2.25)$$

$$NO_x = 2,4589 \cdot \quad - 22,45 \cdot \quad + 348, \text{ ppm}, \quad (2.26)$$

$$SE = -0,0004 \cdot \quad - 0,0211 \cdot \quad - 0,2 \cdot \quad + 1,6686, \quad (2.27)$$

$\theta$  -

(0...20°).

$$(\Delta g_e), \quad (\Delta PM), \quad (\Delta NO_x)$$

$$(\Delta SE)$$

4 11,0/12,5 :

$$\Delta g_e = 0,0396 \cdot \quad - 0,0206 \cdot, \%, \quad (2.28)$$

$$\Delta PM = 0,0006 \cdot \quad - 0,0145 \cdot \quad - 0,1497 \cdot \quad +$$

$$+ 18685 \cdot \quad - 21,797 \cdot \quad + 4,4473, \%, \quad (2.29)$$

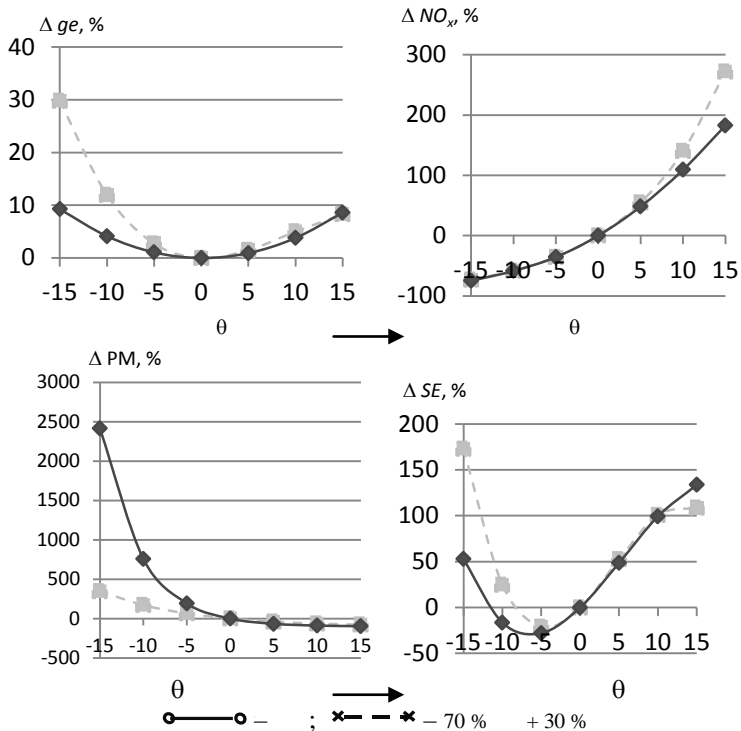
$$\Delta NO_x = 0,2386 \cdot \quad - 8,5148 \cdot \quad + 0,5785, \%, \quad (2.30)$$

$$\Delta SE = -0,0247 \cdot \quad - 0,4017 \cdot \quad - 8,4 \cdot \quad + 1,4163, \%, \quad (2.31)$$

$\theta$  -

(-15...0...+15°).

( . 2.6).



.2.6.

4 11,0/12,5 ( -245.5S2) ,  
 $n = 1800$  -1

6,35°

( -

NO<sub>x</sub> 43 % 29 % SE,

1,7 %

1,14.  
 PM 2,9

ge

NO<sub>x</sub> + PM

NO<sub>x</sub>, PM  
 $\theta$

M<sub>κ</sub>

30 %

$$g_{e \min} = 207 / SE \cdot \theta = 6 \dots 10^\circ, \quad 1,23$$

$$\theta = 2 \dots 4^\circ \quad 1800 \quad -1. \quad 4$$

$$11,0/12,5 \quad (-245.5S2) \quad 15 \%$$

$$\theta_{\text{BNP}}^{\text{opt}} = 3,5 \pm 1^\circ, \quad 30 \%$$

$$\theta_{\text{BNP}}^{\text{opt}} = 3 \pm 1^\circ. \quad 30 \%$$

$$P_z, dp/d\varphi, \quad , c$$

$$(SE),$$

$$(PM), \quad (NO_x) \quad (g_e), \quad (SE) \quad 30\%$$

$$g_e = -6,11 \cdot 10^{-6} \cdot \quad + 0,0003188 \cdot \quad - \quad (2.32)$$

$$-0,003983 \cdot \quad + 0,2211, / \quad ,$$

$$PM = 0,0281 \cdot \quad -0,1 \quad , / \quad , \quad (2.33)$$

$$NO_x = 500 \cdot \quad 0,0875 \cdot \quad , \text{ ppm}, \quad (2.34)$$

$$SE = -0,0004 \cdot \quad + 0,0294 \cdot \quad - 0,1698 \cdot \quad + 1,5905 \cdot \quad (2.35)$$

$$(\Delta g_e), \quad (\Delta PM), \quad (\Delta NO_x)$$

$$4 \quad 11,0/12,5 \quad (\Delta SE) \quad :$$

$$\Delta g_e = -0,003 \cdot \quad + 0,0846 \cdot \quad - 0,0508 \cdot \quad , \%, \quad (2.36)$$

$$\Delta PM = -9 \cdot 10^{-6} \cdot \quad + 0,0005 \cdot \quad - 0,0166 \cdot \quad + \quad (2.37)$$

$$+ 0,4964 \cdot \quad - 10,001 \cdot \quad + 0,036, \%$$

$$\Delta NO_x = 0,4447 \cdot G^2 + 10,862 \cdot G - 1,691, \% , \quad (2.38)$$

$$\Delta SE = 4 \cdot 10^{-16} \cdot G^4 - 0,0475 \cdot G^3 + 0,6261 \cdot G^2 + 8,5572 \cdot G, \% . \quad (2.39)$$

0...30 % ( -245.5S2) -

$$\theta = -3,33 \cdot G + \dots, \text{ } ^\circ, \quad (2.40)$$

$G$  - ;

$\theta$  - -

( $g_e$ ), ( $M$ ), -

( $dp/d\phi$ ), ( $PM$ ), -

( $SE$ ) ( $P_z$ ), -

( $NO_x$ ) 4 11,0/12,5 -

$$M = -17,754 \cdot G^2 + 38,968 \cdot G + M, \dots, \quad (2.41)$$

$$g_e = -7,7778 \cdot G^2 - 21,833 \cdot G + g_e, / \dots, \quad (2.42)$$

$$P_z = -3,3333 \cdot G^2 + 5,8333 \cdot G + P_z, \dots, \quad (2.43)$$

$$dp/d = 0,7778 \cdot G^2 + 0,1967 \cdot G + dp/d, / \dots, \quad (2.44)$$

$$NO_x = 168,67 \cdot G^2 + 176,5 \cdot G + NO_x, \text{ ppm}, \quad (2.45)$$

$$PM = 0,3556 \cdot G^2 - 0,4667 \cdot G + PM, / \dots, \quad (2.46)$$

$$SE = -1,037 \cdot G^2 - 0,3175 \cdot G + SE, \quad (2.47)$$

$M$  - ;

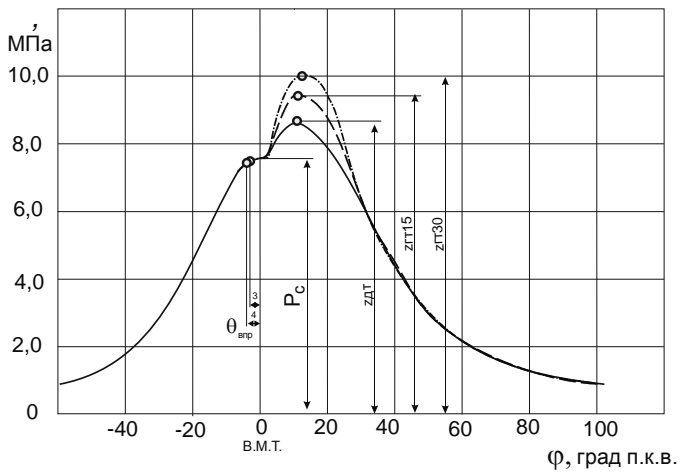
$g_e$  - ;

, / \dots ;

$P_z$  — ;  
 $dp/d\varphi$  — / ;  
 $NO_x$  — , ppm;  
 $PM$  — / ;  
 $SE$  —  $NO_x + PM$  (2.23)

( .2.7)

( .2.8)



—  $\theta = 4^\circ$ ;  $\times - - \times$  — 85% + 15% ,  $\theta = 3,5^\circ$ ;  
 $\square - - \square$  — 70% + 30% ,  $\theta = 3^\circ$

.2.7.

$n = 1800$   $\frac{4}{-1}$  11,0/12,5 ( -245.5S2)

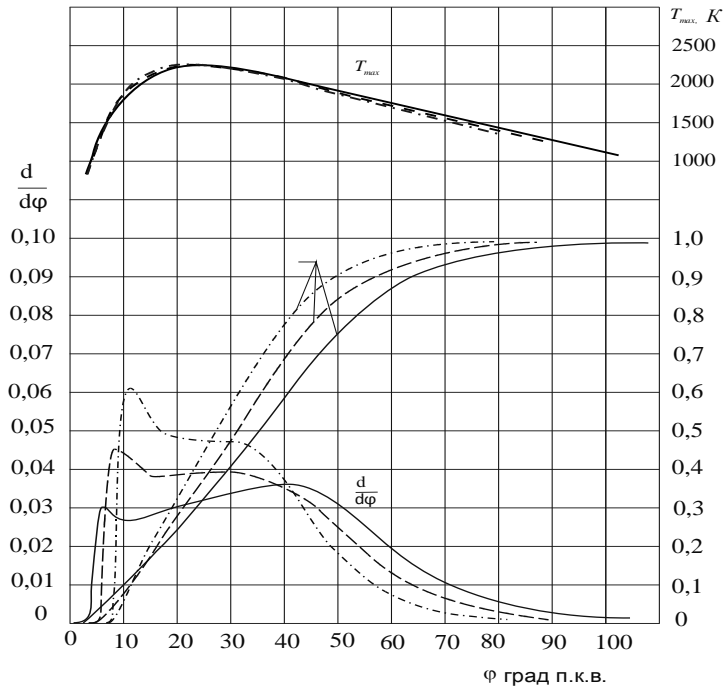
$P_z$ ,  $\theta = 4^\circ$ ,

$P_{z_{15}} = 8,68$  ,  $\theta = 3,5^\circ$  ,  $P_{z_{30}} = 10,13$  ,  $\theta = 3^\circ$  ,

$T_{max}$

$\varphi = 13...18^\circ$  ,

$\varphi = 90^\circ$



$\circ - \circ$  - ,  $\theta = 4^\circ$ ;  $\times - \times$  - 85 % + 15 % ,  $\theta = 3,5^\circ$ ;  
 $\square - \square$  - 70 % + 30 % ,  $\theta = 3^\circ$

. 2.8.

( -245.5S2)

$n = 1800$

-1

4 11,0/12,5

$\chi$

$d\chi/d\varphi$

$\varphi > 40^\circ$

$$\varphi = 94 \dots 104^\circ \quad (2.8).$$

$$\varphi = 80 \dots 90^\circ$$

#### 2.4. Теоретическая модель процесса движения воздуха во впускном коллекторе дизеля

[25].

, . . . 720°

$$t = 1,2 \cdot 10^5 \cdot n^{-1}, \quad (2.48)$$

$n$  –

$$t = 166,67 \cdot n^{-1}. \quad (2.49)$$

-245.5S2

$$n = 1800^{-1}, \quad = 238^\circ$$

22 [79].

$$= v \cdot \frac{F}{f}, \quad (2.50)$$

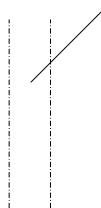
$v$  –  
 $F$  –  
 $f$  –

, / ;  
 , 2;

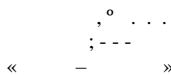
, 2 [22, 20, 60, 76].

» [69] ( . 2.9).

$F$   $^2/c$



. 2.9.



-245.5S2

« - »  
[145]:

( 2 . )

$$F = \frac{1}{0} \int f d , \quad (2.51)$$

=  $d / dt$  -

$f$  -

« - » ( 2 . )  
34° -245.5S2  
(1800 <sup>-1</sup>)  
216 250° ( . 2.9) :

( -

$$F = \frac{1}{188,5} \int_{216}^{250} f d = 0,14374, \quad (2.52)$$

« - » -  
 « - » -  
 ( ) . -  
 , -

$d$  ( . 2.10),  
 $d$ ,  $h$ ,  
 [89].

:

$$F = v \cdot F / (i \quad ), \quad (2.53)$$

$v$  -  
 $F$  -  
 $i$  -  
 -  
 , / ;  
 , 2;  
 ;  
 , / .

. 2.10.

(<sup>2</sup>) -  
AB, -

[49]:

$$F = d h \cdot \cos \alpha, \quad (2.54)$$

$\alpha = 45^\circ$

$$F = d h \cdot \cos 45.$$

$h$

(<sup>2</sup>)  
[89]:

$$F = h (d \cos \alpha + h \sin \alpha \cos^2 \alpha), \quad (2.55)$$

$\alpha = 45^\circ$

$$F = 2,22 h d + 1,11 h^2.$$

2,5

(2.54), (2.55)

2.4.

#### 2.4. Расчет площади проходного сечения впускного клапана дизеля Д-245.5S2

No	$h, \text{ м}$	$F, \text{ см}^2$			%
		(2.54)	(2.55)		
1	0,1	9,4	9,4	9,4	0,00
2	0,5	47,2	47,2	47,2	0,00
3	1	94,4	94,4	94,4	0,00
4	1,5	141,5	141,6	141,6	-0,07
5	2	188,7	188,8	188,8	-0,05
6	2,5	235,9	236,0	236,0	-0,04
7	3	283,1	283,2	283,2	-0,04

(2.54) (2.55)

0,1 %,

[79].

34°.

2,5 , « - »  
 0,14374 2 . ,  
 -245.5S2  
 2 188,8 2 [79].

**2.5. Расчет координат оптимальной точки подачи газового топлива во впускной коллектор дизеля**

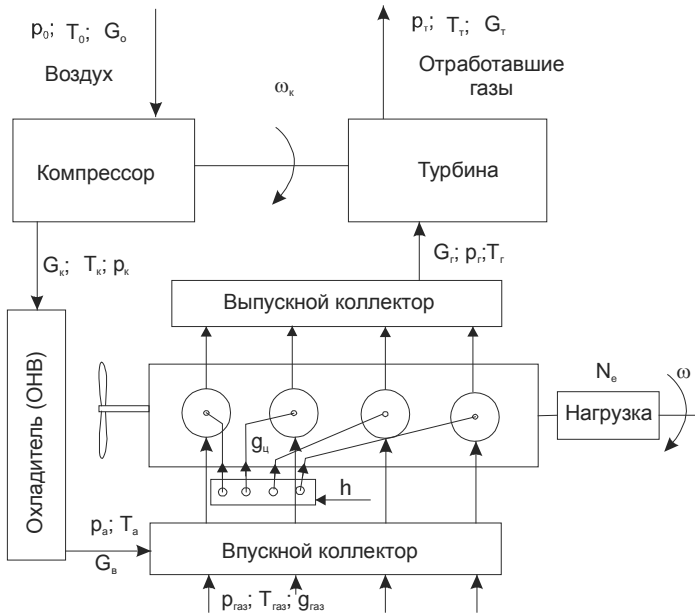
[191].

·  
 · ( ·  
 · ,  
 · (  $nH_m$ )  
 · ,

[15].

· , ·  
 · ,  
 · ,  
 · ,  
 · ,

[92].  
 ( · 2.11).



. 2.11.

$$G - G = 0, \quad (2.56)$$

$$G - \dots, \quad ;$$

$$G - \dots, \quad -$$

$$M \quad ( \quad ) [82, 111]:$$

$$M - M = 0. \quad (2.57)$$

$(T_0 = \text{const} \quad p_0 = \text{const}),$   $G$

$$G = f(i; n), \quad (2.58)$$

$n$  —

;

$G$

(2.56).

[92]:

$$G = G = \frac{v \cdot i \cdot V_h \cdot \dots}{\dots}, \quad (2.59)$$

$v$  —  
 $i$  —  
 $V_h$  —  
 —  
 —

;

;

3;

;

3;

;

3;

;

-1;

[145]:

$$= 1 + 180 + 2; \quad (2.60)$$

$$= 3 + 180 + 4. \quad (2.61)$$

4 11,0/12,5

$\varphi$

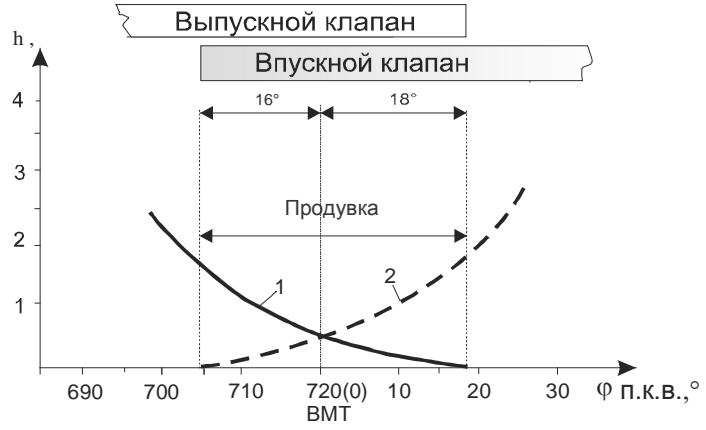
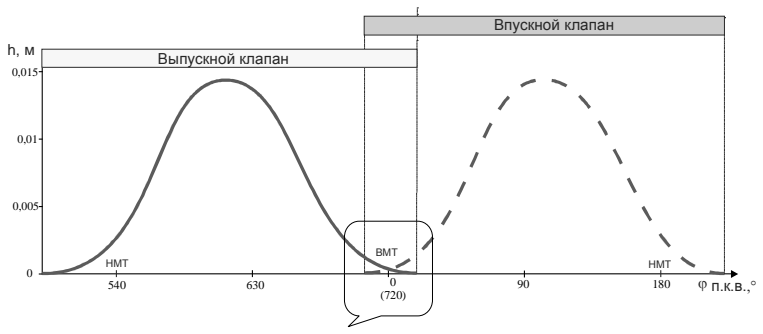
( . . . )

. 2.5.

**2.5. Фазы газораспределения дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (в градусах п.к.в.)**

1	2		3	4		1 + 4
16	42	238	52	18	250	34

$$p_a = p \cdot \frac{p_r}{p} \quad (2.12).$$



2.12.

1 - ; 2 -

$n = \text{const}$

(2.59)

[25]:

$$\bar{G} = \bar{\cdot} \cdot \bar{\cdot}_v \cdot \bar{\cdot} . \quad (2.62)$$

[25]:

$$' = \cdot \cdot_v \cdot \quad (2.63)$$

[25].

( )

[22].

( ) [22].

[22]:

$$r = \frac{M'_r - M_r}{M'_r}, \quad (2.64)$$

$M'_r -$   
 $M_r -$

(2.64),

0 ,D)

$$= \frac{G}{G_1} = \frac{M}{M_1}, \quad (2.65)$$

$$\begin{aligned} G_1 - & , & , & ; \\ G - & , & , & ; \\ M_1 - & , & , & ; \\ M - & , & , & . \end{aligned} \quad (2.65),$$

$1,0\dots1,2$  [102],  
 $= 1,05\dots1,1$  [49].

[76].

[49].

$$= \frac{1}{}, \quad (2.66)$$

$\varphi -$

[49]:

$$G_p = G - G_1 = G ( -1) / , \quad (2.67)$$

$G -$

$G_1 -$

$-$

$$G , \quad (2.67)$$

4 11,0/12,5,

. 2.13.

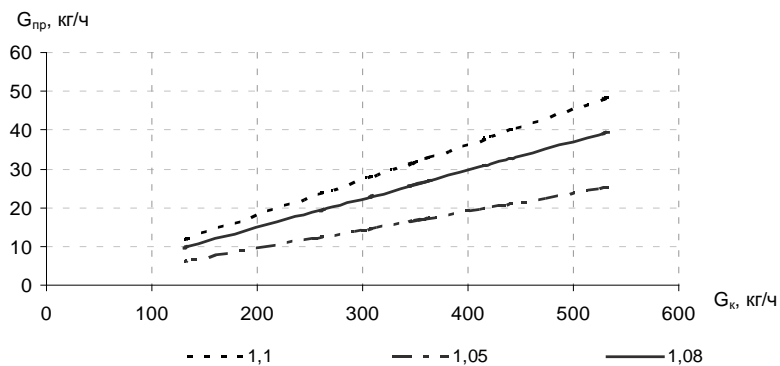
11,0/12,5

$N_e = 70$

530 /

$n = 1800$   $^{-1}$ .

4



. 2.13.  
 $= 1,05, \quad = 1,1 \quad = 1,08$

-245.5S2  
 ( . 2.14).

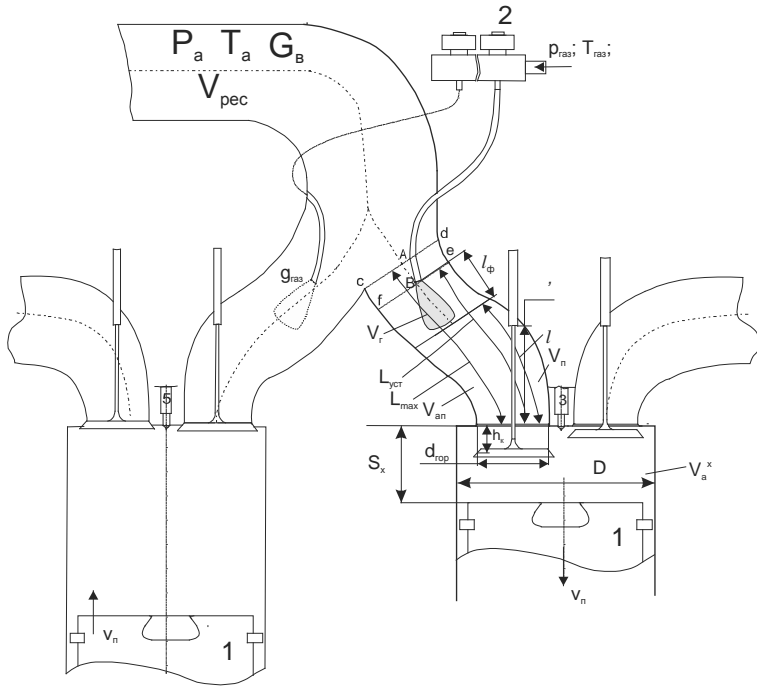
[31].

( , ),

-

( )

(  $l = 0$  )



. 2.14.

-245.5S2

1 – ; 2 –

; 3 –

( . 2.15).

( B, . 2.14, 2.15), L :

$$L \geq l + l_{max}, \quad (2.68)$$

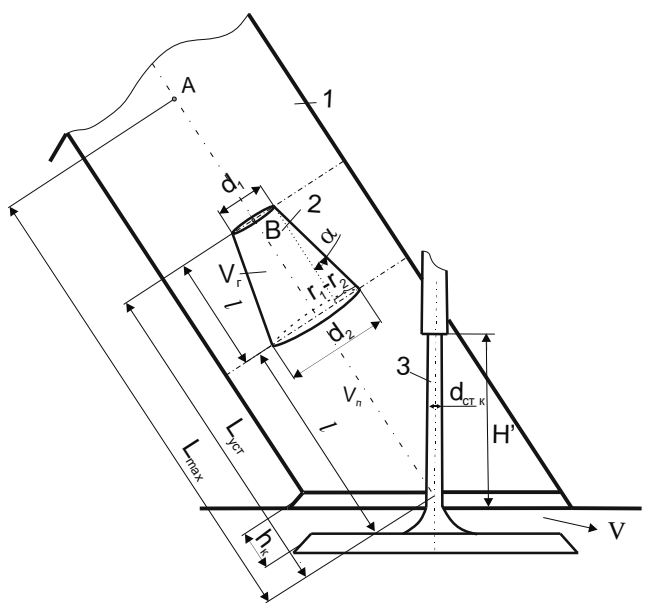
l – ;  
 l – ;  
 L<sub>max</sub> – , ( A, . 2.14, 2.15).  
 l :

$$l = V / S , \quad (2.69)$$

$V$  – , 3;  
 $S$  – , 2.  
 :  
 $V = V + V$ , (2.70)

$V$  – ,  
 (  
 $V$  – ( 3): ), 3;  
 $V = \frac{d^2}{4} \cdot H'$ , (2.71)

$d$  – , ;  
 $H'$  – ,  
 ( .2.14, 2.15), .



.2.15.  
 $1$  – ;  
 $2$  – ( ) ;  
 $3$  – ;

$$V = \frac{1}{3} \cdot l \left( r_1^2 + r_1 \cdot r_2 + r_2^2 \right), \quad (2.72)$$

$r_1, r_2 -$

$$\operatorname{tg} = \frac{d_2 - d_1}{2 \cdot l} = \frac{r_2 - r_1}{l}, \quad (2.73)$$

$d_1, d_2 -$

(2.73)

$$l = \frac{r_2 - r_1}{\operatorname{tg}}. \quad (2.74)$$

(2.72)

$$V = \frac{1}{3} \cdot \frac{r_2 - r_1}{\operatorname{tg}} \left( r_1^2 + r_1 \cdot r_2 + r_2^2 \right) = \frac{1}{3} \cdot \frac{\left( r_2^3 - r_1^3 \right)}{\operatorname{tg}}, \quad (2.75)$$

$$r_2^3 - r_1^3 = \frac{3 \cdot V \cdot \operatorname{tg}}{1}. \quad (2.76)$$

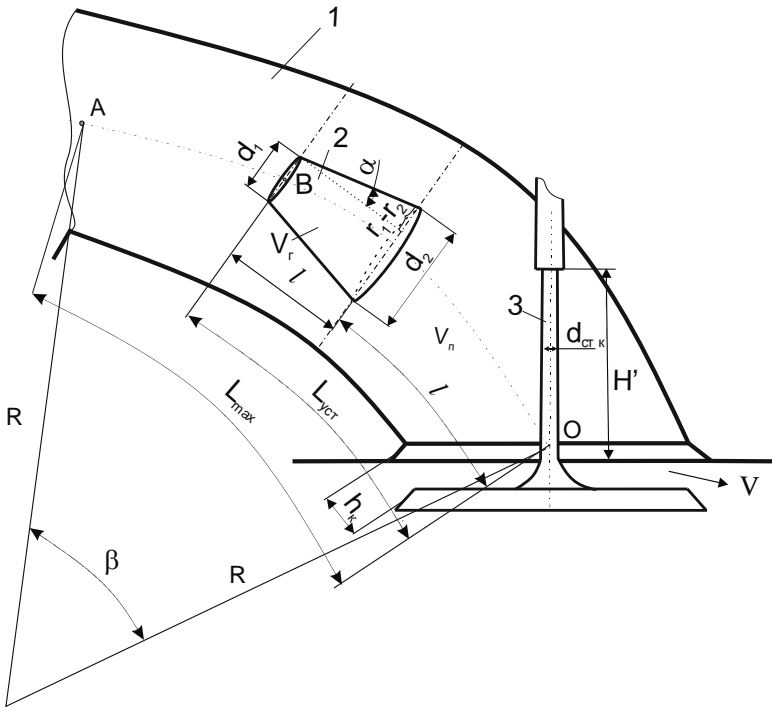
$$r_2 = \sqrt[3]{r_1^3 + \frac{3 \cdot V \cdot \operatorname{tg}}{1}}. \quad (2.77)$$

$$l = \frac{\sqrt[3]{r_1^3 + \frac{3 \cdot V \cdot \operatorname{tg}}{1}} - r_1}{\operatorname{tg}}. \quad (2.78)$$

OA ( . 2.16).

$$L_{max} = \frac{R}{180}, \quad (2.79)$$

$\beta$  – ;  
R –



. 2.16.

1 – ; 2 – ; 3 –

$f_c$  –  
 $v$  –  
 $\Delta t$  –

$$V = f_c \cdot v \cdot \Delta t, \quad [21]: \quad (2.80)$$

$p$  –

(2.78) (2.80) [129].

$$l = \frac{\sqrt[3]{r_1^3 + \frac{3 \cdot (f_c \cdot v \cdot \Delta t) \cdot \text{tg}}{p} - r_1}}{\text{tg}}. \quad (2.81)$$

(2)

$$f_c = \frac{d^2}{4}, \quad (2.82)$$

$d$  –

( / ) [21]:

$$v = \sqrt{2 \frac{(p_0 - p_1)}{p}}, \quad (2.83)$$

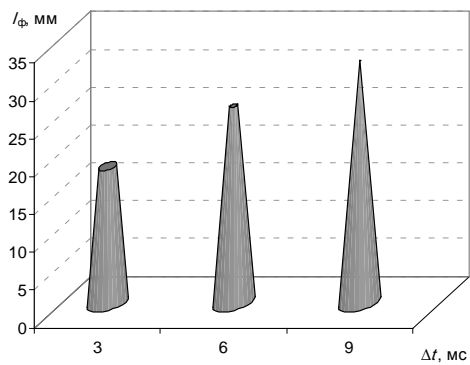
$p_0$  –

$p_1$  –

–

$$d = 0,0015, \quad (p_0 - p_1) = 56 \cdot 10^3, \quad d_1 = 0,006$$

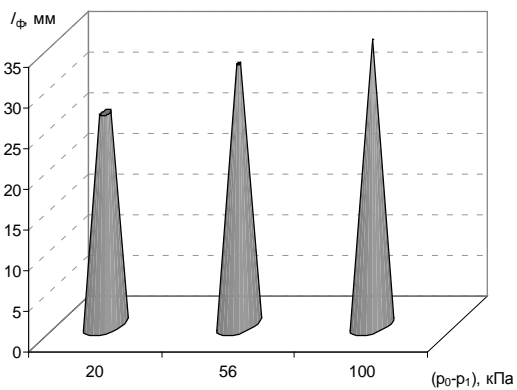
. 2.17.



. 2.17.

$d = 0,0015$  ,  $t = 0,009$  с,  $d_1 = 0,006$   
 [129].

$$(p_0 - p_1) \quad . 2.18$$



. 2.18.

$$(p_0 - p_1)$$

1.

).

(

2.

$$Q_m(\beta) = \frac{P}{RT} \cdot f(\beta) \cdot v(\beta), \quad (2.84)$$

$P$  – , ;  
 $R$  – , / ;  
 $T$  – , ;  
 $f$  – , <sup>2</sup>;  
 $v$  – , / .

$$\frac{dQ_m(\beta)}{d\beta} = \frac{P}{RT} \left( f \frac{dv}{d\beta} + v \frac{df}{d\beta} \right), \quad (2.85)$$

$$\frac{dQ_m(\beta)}{d\beta} -$$

(2.85) , / .

$h$  ( <sup>2</sup> )  
 [129]:

$$f = h (d \cos \beta + h \sin \beta \cos^2 \beta), \quad (2.86)$$

$\beta$  – , ;  
 $h$  – , ;  
 $d$  – , .

$$d = {}_1D, \quad (2.87)$$

${}^1D$  – ,  ${}_1 = 0,38...0,42$  [129];

$$A-C, C-B, B-C' \quad C'-A'. \quad (2.19).$$

2.19.

[89]

1-  $A \quad C$  (2.19)  
 [129]:

$$h = (r_1 - r_0)(1 - \cos \phi_1), \quad (2.88)$$

$r_0 -$   $A \quad A'$  (2.19)  
 $B$   
 $h_{\max}$ .

[79]:

$$h_{\max} = h_{\max} l / l,$$

$l \quad l -$

$$\frac{l}{l} = \frac{h_{\max}}{h_{\max}}. \quad (2.89)$$

[129].  $l / l$

:

$$h = \frac{l}{l} (r_1 - r_0) (1 - \cos \rho_1), \quad (2.90)$$

$r_1 -$   $AC$  ( . 2.19).  
 ( <sup>3</sup>), ; , -

$$V = \frac{V_h}{2} \left[ \frac{+1}{-1} - \cos - \frac{1}{4} (1 - \cos 2) \right], \quad (2.91)$$

$V_h -$  , <sup>3</sup>;  
 - ;  
 - , ;  
 - .  
 4

11,0/12,5

$$= \frac{R}{l}, \quad (2.92)$$

$R -$  , ;  
 $l -$  , .  
 , [129]

$$V_h = \frac{D^2}{4} \cdot H, \quad (2.93)$$

$D -$  , ;  
 $H -$  , .  
 ( /):

$$v = \cdot R \cdot \left[ \sin( ) + \frac{1}{2} \sin 2 - k \cos \right], \quad (2.94)$$

-  
 - , / ;  
 $k -$  , .

$$k = \frac{a}{R}, \quad (2.95)$$

$a =$  -  
 $1 = 0,279$  -  
 $4 = 0,314$  -  
 $1 + 4 = 0,593$  -  
 ( . . . 2.7). -

$$(2.91) \quad (2.94)$$

$$V = \frac{V_h}{2} \left[ \frac{+1}{-1} - \cos(\dots) - \frac{1}{4} (1 - \cos(2 \dots)) \right], \quad (2.96)$$

$1 -$  -  
 ( / ) -

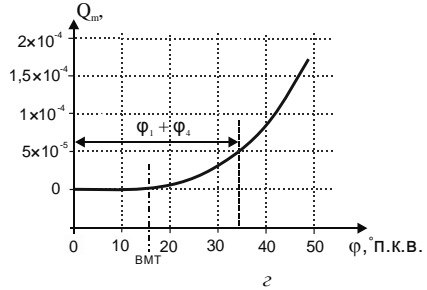
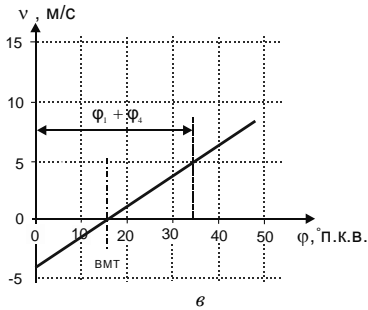
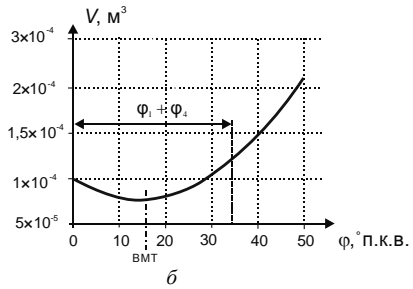
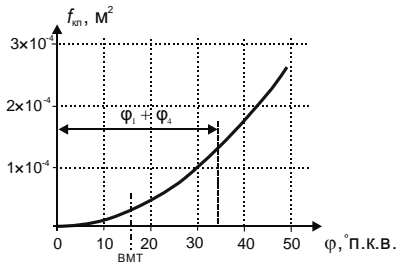
$$v = \cdot R \cdot \left[ \sin(\dots) + \frac{1}{2} \sin 2(\dots) - k \cos(\dots) \right]. \quad (2.97)$$

(2.84), (2.86), (2.96) (2.97) *Mathcad 14.0*  $d =$   
 $= 0,042$  ,  $= \frac{1}{4}$  ,  $V_h = 0,012$   $^3$  ,  $= 17$  ,  $= 188,5$  / ,  $R = 0,0625$  ,  
 $l = 0,23$  ,  $= 0,272$  ,  $k = 0,001$  [111], . 2.20.

( $^3$ ) -

$$Q_v(\dots) = \frac{P}{RT} \cdot f(\dots) \cdot v(\dots), \quad (2.98)$$

- , /  $^3$ .



. 2.20. : a -  
в - ; з -

; б - ;

( / <sup>3</sup> )

[76]:

$$= \frac{p \cdot 10^6}{R \cdot T}, \quad (2.99)$$

R - , R = 287 / ( . ).

\Phi\_4 ( . . ) .

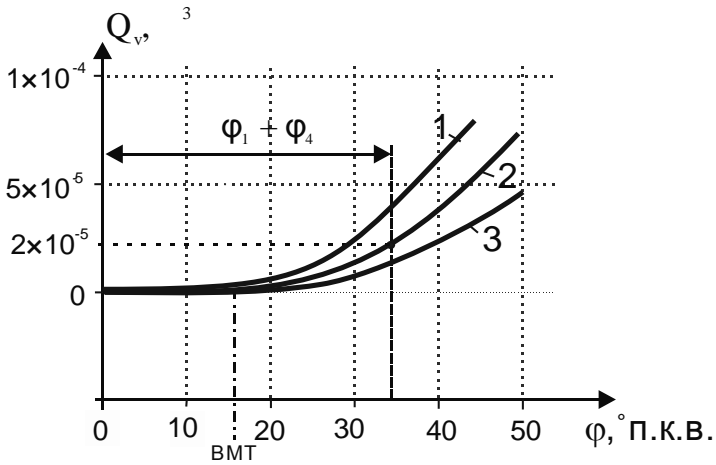
T ( )

[76, 25]:

$$T = T_0 \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{n-1}{n}}, \quad (2.100)$$

$p_0 -$  , ;  
 $p -$  , , ;  
 $n -$  , -  
 $n = 1,4...1,8$   
 [76, 25].  
 (2.63)

. 2.21.



. 2.21.

1- ,  $= 209,4^{-1}$ ; 2-  $= 188,5^{-1}$ ; 3-  $= 146,6^{-1}$

$(\varphi_1 + \varphi_4) = 0,5934$  ( $34^\circ \dots$ )  $l/l = 0,7; p = 158 \cdot 10^5$  ,  
 $T = 380$  ,  $n = 1,6$ ;  $= 1,834 / ^3$  ,  $4 \quad 11,0/12,5$  -  
 $2 \cdot 10^{-5} ^3$  .

$l$  -  
 $(\quad = 188,5^{-1})$  , -  
 (2.68), (2.98)  $L \geq 0,040$   $L_{max}$  [174, 69]. , -  
 $4 \quad 11,0/12,5$  ,  
 $40$  .

## 2.6. Разработка системы питания дизеля газовым топливом

21, 32, 33, 34, 67, 70, 98, 124, 110, 152, 187] [9, 10, 12, -

2,

*Система подачи газового топлива в двигатель внутреннего сгорания на переходных режимах* (8104)  
[156].

( .2.22)

13 16 11 14, -  
2 11 9 7 -  
9. 11 9 -  
5 4. -  
2 1 9 11 7 -  
21 ( ) 5 -  
4. -  
2 1, 11 9 7 -  
) 5 21 ( -  
4. -  
13 1 7 -  
11 9 5 , 2,  
7 5 4. -  
18 20 19.

. 2.22.

4 – ; 1 – ; 2 – ; 3 – ;  
9 – ; 5 – ; 6 – ; 7 – ; 8 – ;  
14 – ; 10, 12 – ; 11 – ; 13 – ;  
19 – ; 15, 17 – ; 16 – ; 18 – ;  
; 24 – ; 20 – ; 21 – ( ) ; 22, 23 – -  
27 – ; 28 – ; 26 – ; 29 – ;  
; 30 –

5 4 -  
3 ( ) -  
26 , 27 -  
, 31 32 -  
33, 24. -  
Система подачи газового топлива дизель ( -  
8107) [159].

, ( . 2.23)

29 11, 11 28 -  
 12 -  
 7 1. ( 11), 29 -  
 12 -  
 7. 28 12 29 -  
 11, 11 12 -  
 7. 24 , 30 %, 22, -  
 19 23, 13 -  
 1, 21 -  
 9 . 2 -  
 12 12 -  
 7, 1. -  
 , 12 -  
 17, 18 -  
 2 1 -  
 24 , -  
 13 19 , -  
 15 14 -  
 16, 23.

1 - . 2.23. ; 2 - ; 3 - -  
 ; 4 - ; 5 - , -  
 9 - ; 6 - ; 7 - ; 8 - ;  
 ; 10 - ; 11 - ; 12 - ; 14 - ;  
 15 - ; 13 - ; 16 - ; 17 - -  
 ; 18 - ; 19 - -  
 ; 20 - ; 21 - ; 22 - ; 23 - ; 24 - -  
 ; 25 - ; 26 - ; 27 - ;  
 28 - ; 29 - ; 30 - ;

*Система подачи газового топлива дизель (* -  
 8351) [160].

( . 2.24) -

28

14

13,

7

1.

. 2.24. : 1 - ;  
 2 - ; 3 - ;  
 4 - ; 5 - ; 6 - ; 7 - ;  
 ; 8 - ; 9, 22 - ; 10 - ; 11, 13 - -  
 ; 12 - ; 14 - ; 15 - ;  
 16 - ; 17 - ; 18 - -  
 ; 19 - ; 20 - ; 21 -  
 ; 23 - ; 24 - ; 25 - -  
 ; 26 - ; 27 - ; 28 - ;  
 29 - ;

28

12

11 13),  
13,

14

11,

11 13 7.  
 24, 30 %, -  
 19 23, 26, -  
 9 1, 16  
 2 14  
 14 7, -  
 1. -  
 14 -  
 2 -  
 21 1 -  
 24 1 -  
 19, 14 -  
 15 16 18,  
 17 23. -  
 Система подачи газообразного топлива в дизель ( -  
 9079) [161]. ( . 2.25) -  
 9 7) ( -  
 14 -  
 11, 1, 8. ( -  
 26 ), , ( -  
 9, 26 30 -  
 26 -  
 30 14,

.2.25. : 1- ;  
 2- ; 3- ;  
 4- ; 5- ; 6- ; 7- ;  
 ; 8- ; 9- ; 10- ; 11-  
 ; 12- ; 13- ;  
 17- ; 14- ; 15- ; 16- ;  
 ; 18- ; 19- ; 20- ;  
 24- ; 21- ; 22- ; 23- ;  
 ; 25- ; 26- ; 27- ;  
 ; 28- ; 29- ; 30-

40 % 24  
 23, 20 21,  
 19, 13,  
 12, 18.

1.  $0,5 \frac{1}{2}$  13 -  
 2 14 -  
 14 , -  
 11, 1. -  
 24 1 -  
 20 , -  
 19 , 16 -  
 15 23. -  
 17, 16  
 Адаптивная система подачи газового топлива в дизель ( ( . 2.26)  
 9959) [1].  
 .  
 7 -  
 , . ,  
 11, , 17, 18,  
 13, 20,  
 21, -  
 7, ,  
 1. ,  
 50 % ,  
 30 29 28 -  
 24 ,  
 22, 9  
 10 1.

. 2.26.

1 - ; 2 - ; 3 - ; 4 - ; 5 - ; 6 - ; 7 - ; 8 - ; 9 - ; 10 - ; 11 - ; 12 - ; 13 - ; 14 - ; 15 - ; 16 - ; 17 - ; 18 - ; 19 - ; 20 - ; 21 - ; 22 - ; 23 - ; 24 - ; 25 - ; 26 - ; 27 - ; 28 - ; 29 - ; 30 - ; 31 - ; 32 - ;

2 ( ) 12 -  
 17 -  
 ( ) , -  
 17 -  
 7, -  
 1. -  
 , -  
 17 -  
 20, 21 -  
 2 18 -  
 . -  
 17 1 -  
 11, 30 , -  
 22, 24 -  
 25 , -  
 26 -  
 29.

Электронная система впрыска газового топлива в дизель (10060) [193]

( .2.27).

50 % ( , -  
 2 22), -  
 10 -  
 1 .

.2.27. :

1- ; 2- ; 3- -  
 ; 4- ; 5- ; 6- -  
 ; 7- ; 8- ; 9- ;  
 10- ; 11- ; 12- ;  
 13- ; 14- ; 15- -  
 ; 16- ; 17- ; 18- ;  
 19- ; 20- ; 21- ; 22- -  
 ; 23- ;  
 ; 24- ; 25- ; 26- -  
 - ; 27- ; 28- ;  
 29- ; 30- ; 31- ;  
 32- ; 33- ; 34- ; 35- ;

, 50 %  
 17,  
 2, 12, -  
 7, 22,  
 16  
 7,  
 1. , -  
 45 % 29 , -  
 28 27 -  
 23 , -  
 15, 13 -  
 10 8 11 -  
 9 34 32, -  
 35. -  
 17  
 2 ( ) 20  
 10,  
 1. -  
 17 , -  
 . -  
 17 1 -  
 12, 28 , -  
 15, 50 % -  
 , 23 -  
 25 ( , ) ,  
 26 -  
 29.  
 . 2.28 *системы подачи газового топлива*  
 в дизель [158].

. 2.28. :

1- ; 2- ; 3- -

7- ; 4- ; 5- ; 6- ;

10- ; 8- ; 9- ;

14- ; 15- ; 12- ; 13- ;

20- ; 17- ; 18- ; 19- ;

21- ; 22- ;

23- ; 24- ;

25-

27, , 2, 1,

(

14),  
 2 14 27,  
 12  
 7  
 1, 18  
 .  
 , 27  
 2  
 12,  
 14,  
 12 12  
 13,  
 12 14  
 7,  
 1.  
 80...85 %, 24  
 19 23,  
 16  
 1 22  
 9 .  
 ,  
 27 2  
 14,  
 12 7,  
 , .  
 .  
 14  
 21,  
 70° .

*Система впрыска газового топлива в двигатель внутреннего сгорания типа дизель [155].*

. 2.29. :  
 1 - ; 2 - ; 3 - ;  
 ; 4 - ; 5 - ;  
 ; 6 - ; 7 - ;  
 8 - ; 9 - ; 10 - ;  
 11 - ; 12 - ; 13 - ;  
 14 - ; 15 - ; 16 - ;  
 ; 17 - ;  
 18 - ; 19 - ; 20 - ; 21 - ;  
 ; 22 - ; 23 - ;  
 ; 24 - ; 25 - ; 26 - ;  
 ; 27 - ; 28 - ;  
 29 - ; 30 - ; 31 - ;

. 2.30

1,  
10  
35.

34

32,  
33,

9

9  
-

1- 33- . 2.30. ; 9- ; 10- ;  
; 34- ; 35- ;

50 %

2

(

22),

10

1

50 %

17

2,

12,

7,

22,

16

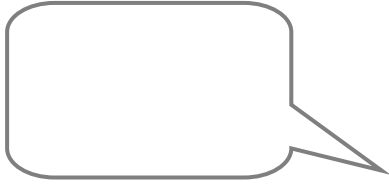
7,

1.

45 %

,

28 29 27  
 , 13 23 15, -  
 11 33 10, 32 -  
 35. 34 9  
 17 2 ( ) 20  
 10, 1.  
 17 , -  
 12, 17 1 -  
 15, 28 , -  
 50 % 23 -  
 25 ( ), -  
 26 - -  
 29. -  
 50 % -  
 ( ) -  
 ( .2.31), ( 2633337 [193]). -



.2.31. :

1- ; 2- -  
; 4- ; 5- ; 6- ; 3- -  
; 7- ; 8- ; 9- ;  
10- ; 11- ; 12- ;  
13- ; 14- ; 15- ;  
; 16- ; 17- ; 18- ;  
19- ; 20- ; 21- ; 22- -  
; 23- -  
; 24- ; 25- ; 26- -  
- ; 27- ; 28- ;  
29- ; 30- ; 31- ;  
32- ; 33- ; 34- ; 35- ;

28 -  
29 27  
23 , 13  
15, 11  
10 8 32,  
34,  
35. 9  
17 2 ( ) 20  
10,  
1.  
, 17  
12 17 28 ,  
15, 50 % 23  
25 ( , ),  
26 -  
29.

### 2.7. Выводы по главе 2

1. 4 11,0/12,5. ,  
,  
.  
2. 4 11,0/12,5 ,  
, = 1,3...1,7,  
.

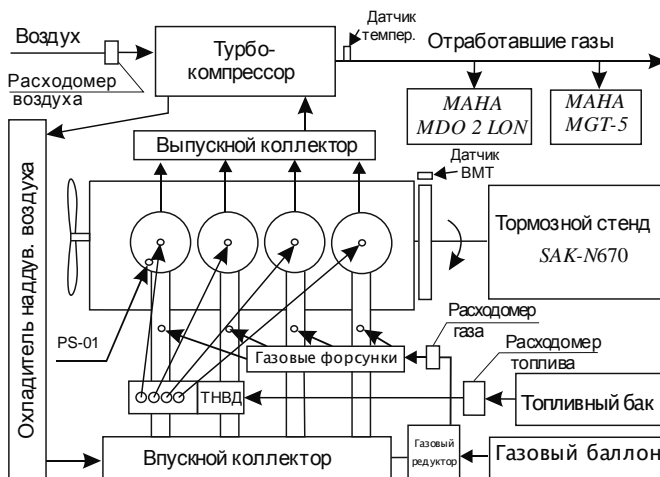




1	2	3
		$70 \pm 2$
	-1	1800
	.	464
	-1	1400
	.	2
		14 101 01
		773.40 02
		$24,5^{+1,2}$

### 3.2. Экспериментальная установка для проведения стендовых испытаний

. 3.2 3.3.



. 3.2.

SAK-N670 ( )  
RAPIDO ( . 3.3),  
18509-88 [55, 58].

96

. 3.3.

I-

SAK-N670  
RAPIDO ( ):  
; 2-

, . 3.4.

. 3.4.

233534 ( -245.5S2) « « », -  
 . 3.5.

. 3.5. , -  
 - ( . ). -  
 , ' . 3.2.

**3.2. Приборы и оборудование, входящие в состав экспериментальной установки**

1	2	3	( ) 4
	<i>RAPIDO</i>	·	0,5 %
		<sup>-1</sup>	0,2 %
	<i>MDO 2 LON</i>	%	±1,5 %
	-50	/	±0,5%

1	2	3	4
		/	±0,04 %
	MGT 5	, 2	±3 %
		2	±4 %
		C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	±5 %
		NO <sub>x</sub>	±3 %
	-4	°	±0,25%
-	-100	°	±6 %
	-160		±1,5 %
	PS-01		±3 %

[55] ( . 3.6 3.7) -  
[4, 58].

a b  
 . 3.6. MAHA MDO2 LON :  
 a – MAHA MDO2 LON ( ); b –

U- U-

.3.7. MAHA MGT-5 ( )

-50

( .3.8).

.3.8.  $a$   $b$   
 $a-$  -50 ;  
 $b-$

, «RAPIDO» -  
.  
[151] -2110 -  
(24,6 ), -  
( ) .

[151]

-15711-01

-

,

-

-

.

-

-

.

( . 3.9)

-

[193],

-

,

,

,

,

.

.3.9.

*Landi Ranzo IGI*

( . 3.10)

200

,

.

. 3.10. *Landi Ranzo IGI* ( )

-30/1

24 ( . 3.11).

. 3.11. -30/1,

*Valtek Type 30*

( . 3.12).

*OSCAR-N diesel,*

( . 3.13).  
*USB*

*a* *b*  
. 3.12. *Valtek Type 30; b* -

*a* *b*  
. 3.13. *OSKAR-N; b* -

*STRUMENTS cDAQ-9178 ( . 3.14).* *NATIONAL IN-*

. 3.14.

( ),

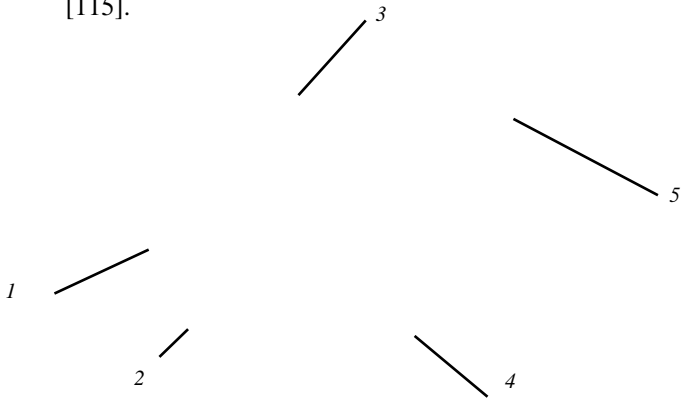
,

PS-01

-

( . 3.15),

[115].



. 3.15.

1 -  
3 -

; 4 -

5 -

PS-01

; 2 -

( );  
NI cDAQ-9178;

0,1...25

±3 %.

### 3.3. Экспериментальная установка для проведения натуральных испытаний

« -922»,  
 ( . 3.16, 3.17).  
 , . 3.18–3.20 . 3.3.  
 1500

. 3.16. « -922» :  
 1 – ; 2 – ;  
 3 – ; 4 –

#### 3.3. Приборы и оборудование, входящие в состав экспериментальной установки

			( )
		<i>MDO 2 LON</i>	±1,5 %
		<i>MGT 5</i>	±3...5 %
		<i>AVL DISpeed 492</i>	±0,02 %
	-	-5 - 31	±1 %
	[56]	<i>Spider 8</i>	±2 %

.3.17. « -922»: ; 3- ;

1- ; 2- ; 4- ; 5- ;

-5 31 ( .3.18).

*a* *b*

.3.18. 31 :

*a*- ; *b*- ; -5;

1- ; 2- ;

3-

( .3.19), Spider 8

2

3

4

1

. 3.19.

1 –  
3 –

« -922»:  
; 2 –  
; 4 –

Spider 8;

*MDO 2 LON*  
( . 3.20).

MGT 5,

-  
-

. 3.20.

1 – *MDO 2 LON*; 2 –  
« -922»; 4 –  
5 –

« -922»:  
*MGT 5*; 3 –

;

( . 3.21)  
( ).

[141]

-  
-

. 3.21. « -922» ( . )

-

### 3.4. Общая методика исследований

-

4 11,0/12,5.

-

11,0/12,5.

4

11,0/12,5  
[156, 157, 158].

4

-

-

-

-

« -922» -3-35  
 -3,6-01

*Spider 8,*

- - 5, ( 1658-2012) ( . 3.4),  
 27578-87, ( . 3.5),  
 » SAE 10W-40 CF-4 00044434-026-2013

[151, 149].

#### 3.4. Основные показатели дизельного топлива ДТ-Л-К5

/		1658-2012		
1		51	51,2	3122
2		46,0	53,1	4264
3	15 ° , / ³	820,0-845,0	834,4	51069
4	40 ° , , ²/ ( )	2,00-4,00	2,86	33
5	- , / , 5	10,0	3,9	52660
6	, °	55	67	6356
7	, /	200	30,2	EN ISO 12937
8	(WSD 1,4) 60 ° , ,	460	439	12156-1
9	, %	8,0	3,8	EN 12961

**3.5. Состав газового топлива марки ПБА, применяемого в качестве добавки при проведении стендовых испытаний дизеля и натуральных испытаний трактора [141]**

/			, %
1		4	0,38
2		2 6	5,95
3		3 8	50,54
4		( 3)3	13,03
5		4 10	29,74
6		3( 2)3 3	0,36
	...		100

4 11,0/12,5 -

, , :

1800 -1 1400 -1 -

27578-87, 18509-88, 20000-82,  
 17.2.1.03-84, 17.2.1.02-76, 17.2.2.01-84,  
 17.2.2.02-98, 17.2.2.07-2000, 52517-2005,  
 8178-7-99.

*MAHA MGT-5* *MAHA MDO 2 LON* -  
 [4, 57]. -

[97, 142]. -

7057-2001. ( , -  
 ) 20915-2011.

2001. - 30745-

**3.5. Методика исследований дизеля при применении газового топлива**

$p$

(3.1)

[151].

(3.5) [55, 76]

4°,

:

$$P = \frac{30 \cdot \tau \cdot N_e}{V_h \cdot i \cdot n} = \frac{\pi \cdot \tau \cdot M}{10^3 \cdot V_h \cdot i}, \quad (3.1)$$

$\tau$  –  
 $V_h$  –  
 $i$  –

$$\tau = 4;$$

$$N_e = \frac{P \cdot n}{1000}, \quad (3.2)$$

$P$  –

$$M = \frac{1000 \cdot N_e}{\omega}, \quad (3.3)$$

$\omega$  –

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \quad (3.4)$$

$n$  –

$$g_e = \frac{1000 \cdot G}{N_e}, \quad (3.5)$$

$G$  –

### 3.5.1. Методика исследований рабочего процесса дизеля при работе с добавками газового топлива

*Measurement & Automation Explorer*

1 [115].

[193]; C [141].

**3.5.2. Методика стендовых испытаний дизеля  
при работе с добавками газового топлива**

18509-88.

85...95 °

2 %

5

5

-1.

### 3.5.3. Методика расчетно-теоретических исследований работы дизеля с добавками газового топлива

[193]

[24].

1)

$$S_y^2 = \sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^m \frac{(y_{u_i} - \bar{y})^2}{N \cdot (m-1)}, \quad (3.6)$$

$N \cdot (m-1)$  -

$y_{u_i}$  -

$\bar{y}_u$  -

2)

$$G_P = \frac{S^2_{y_{\max}}}{S^2_y} < G_T, \quad (3.7)$$

$G_P, G_T$  -

$S^2_{y_{\max}}$  -

3)

, : -

$$b_o = \bar{y}_o, \quad (3.8)$$

$$b_i = A\{i y\}, \quad (3.9)$$

$$b_{ii} = B\{ii y\} + C_1 \sum_j^{n_1} \{jj y\} + C_2 \sum_l^{n_2} \{ll y\} - \left(\frac{\bar{y}_o}{n}\right), \quad (3.10)$$

$\bar{y}_o$  - ;

$$\sum_j^n \quad \sum_l^{n_2} -$$

$j, l$

E B

5)  $F_{P, F_T} - S^2_{LF} -$   $F-$  :

$$F_P = \frac{S^2_{LF}}{S^2_Y} < F_T, \quad (3.16)$$

$F_P, F_T - S^2_{LF} -$   $F-$  ; , -

$$S_{LF} = \sum \frac{\hat{y}_u - \bar{y}_u}{N - (k + 1)}, \quad (3.17)$$

$\hat{y}_u -$  ;  $k -$   $P = 0,95.$

*Microsoft Excel, Statgraphics Plus, Mathcad Corel DRAW.*

### 3.5.4. Методика испытания машинно-тракторного агрегата с добавками газового топлива

( ) « -922», ( )  
 ) -245.5 [193].  
 : ( « » -3-35)  
 ( -3,6-01).

, [150, 149].  
 30 [90].  
 200  
 [182].  
 ( ) « -922»  
 -3-35 ( . 3.22)  
 : -  
 - 1-  
 - 18,2 %,  
 201,1 / <sup>2</sup> [75, 113, 116]. - 0,3°

. 3.22. « -922» + -3-35  
 « -922» -3-35  
 ,  
 1800 -1.  
 3- 1-  
 0,15...0,25 .  
 « -922» -3,6-01 ( . 3.23)  
 (19,4 %)  
 [75, 113, 116].

1- « -922» -3,6-01 2- -  
 1800 -1. -

«Microsoft Excel» «Mathcad 14».

. 3.23. « -922» + -3,6-01  
 x ( )  
 :

$$x = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i, \quad (3.18)$$

$x_i -$  ;  
 $m -$  .  
 ,  $\sigma_i$  -

[128]:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (x_j - x)^2}{m-1}}. \quad (3.19)$$

[128]: ,

$$\lim x_{\min} > x_i > \lim x_{\max}, \quad (3.20)$$

$$\lim x_{\max} = x + k(x_{\max} - x_{\min}), \quad (3.21)$$

$$\lim x_{\min} = x - k(x_{\max} - x_{\min}),$$

$$\lim x_{\max} - \lim x_{\min} =$$

$$k - \quad ; \quad , k = 1, 8.$$

[128]:

$$G = \frac{\sigma_{i\max}^2}{\sum_i^N \sigma_{i\max}^2}, \quad (3.22)$$

$$G - \quad (3.22)$$

### 3.6. Обработка результатов экспериментальных исследований

«Microsoft Excel», «Mathcad 14».

$$x = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m x_i, \quad (3.23)$$

$x$  –  
 $m$  –  
 $x_i$  –

) [28, 41, 64, 128]:

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_i - x)^2}{m-1}}. \quad (3.24)$$

$\lim x_{\max}$     $\lim x_{\min}$  [128]:

$$\lim x_{\max} = x + k \cdot (x_{\max} - x_{\min}), \quad (3.25)$$

$$\lim x_{\min} = x - k \cdot (x_{\max} - x_{\min}), \quad (3.26)$$

$\lim_{x_{\max}}$   $\lim_{x_{\min}}$  -

$k -$  , ; ,  $k = 1, 8.$

[128]:

$$G = \frac{i_{\max}^2}{\sum_{i=1}^m i_{\max}^2}, \quad (3.27)$$

$G -$  . (3.27)

### 3.7. Ошибки и погрешности измерений

( ( ) ) .

$$N = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

$$\Delta N = \pm [\Delta N_1(x_1) + \Delta N_2(x_2) + \Delta N_3(x_3) \dots + \Delta N_n(x_n)], \quad (3.28)$$

$N -$  ;  
 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n -$

$$\frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{[\Delta N_1(x_1) + \Delta N_2(x_2) + \Delta N_3(x_3) \dots + \Delta N_n(x_n)]}{f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)}. \quad (3.29)$$

$$\Delta M = \pm [\Delta P + \Delta l], \quad (3.30)$$

$P$  — , ;  
 $l$  — , .

$$\frac{\Delta M}{M} = \pm \left[ \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta l}{l} \right]. \quad (3.31)$$

$$\Delta N = \pm [\Delta P + \Delta l + \Delta n], \quad (3.32)$$

$n$  — , <sup>-1</sup>.

$$\frac{\Delta N}{N} = \pm \left[ \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta n}{n} \right]. \quad (3.33)$$

$$\Delta G_{\Sigma} = \pm (\Delta G + \Delta G'), \quad (3.34)$$

$$\frac{\Delta G_{\Sigma}}{G_{\Sigma}} = \pm \left( \frac{\Delta G + \Delta G'}{G_{\Sigma}} \right). \quad (3.35)$$

$$\Delta g_e = \pm (\Delta G_{\Sigma} + \Delta N_e) = \pm (\Delta G + \Delta G' + \Delta N_e). \quad (3.36)$$

$$\frac{\Delta g_e}{g_e} = \pm \left( \frac{\Delta G_{\Sigma}}{G_{\Sigma}} + \frac{\Delta N_e}{N_e} \right) = \pm \left( \frac{\Delta G}{G_{\Sigma}} + \frac{\Delta G'}{G_{\Sigma}} + \frac{\Delta N_e}{N_e} \right). \quad (3.37)$$

. 3.6.

### 3.6. Предельные ошибки вычислений и измерений

1	2	3, %
1.	1	0,05
2.	5 <sup>-1</sup>	0,004
3.	1	0,05
4.	0,2	0,6
5.	0,005	0,55
6.	0,02 /	0,023
7.	0,02 /	0,009
8.	1,1 /	0,5
9.	2,8 /	2,6
10.	0,01	2,1
11.	1°	0,0625
12.	0,1	0,001
13.	10	0,05

	1	2	3
14.		1 °	0,0625
15.		1 °	0,0625
16.		1 °	0,0625
17.		1 %	0,024
18.		1,5 %	0,0067
19.	O	3 %	0,033
20.	O <sub>2</sub>	3 %	0,033
21.	$nH_m$	3 %	0,033
22.	NO <sub>x</sub>	3 %	0,033
23.		0,001 /	0,033
24.		0,1 . . . .	0,011

### 3.8. Выводы по главе 3

-  
-  
-  
-

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4 11,0/12,5

### 4.1. Влияние добавки газа на регулировки, рабочий процесс и тепловыделение дизеля 4ЧН 11,0/12,5

...

( )

$$1800 \text{ }^{-1} [115, 160]$$

. 4.1.

...

[151].

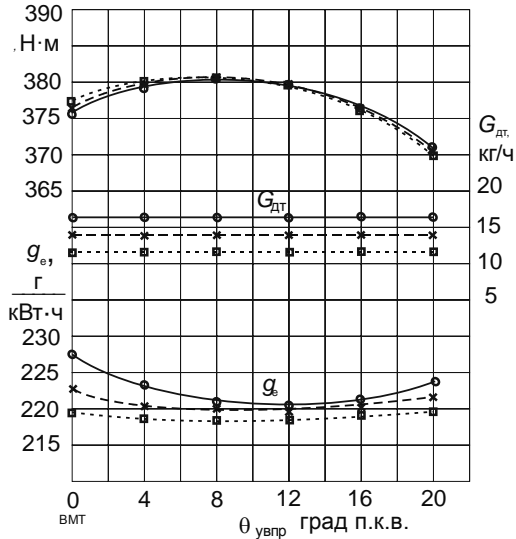
$n = 1800 \text{ }^{-1}$ ,

$g_{e \text{ min}} = 221,8 /$

$\theta = 11,5^\circ$ .

13,48 / , 15 %

$g_{e \text{ min}} = 221,8 /$   $\theta = 10,8^\circ$ .



○ — ; × — × — 85 % + 15 % ; □ — □ — 70 % + 30 %

.4.1. 4 11,0/12,5  
n = 1800 -1

11,06 / , 30 %

$$g_{e \min} = 217,7 / \cdot 10^\circ$$

4 11,0/12,5

0,5° 10 %  
30 %

.4.2

4 11,0/12,5

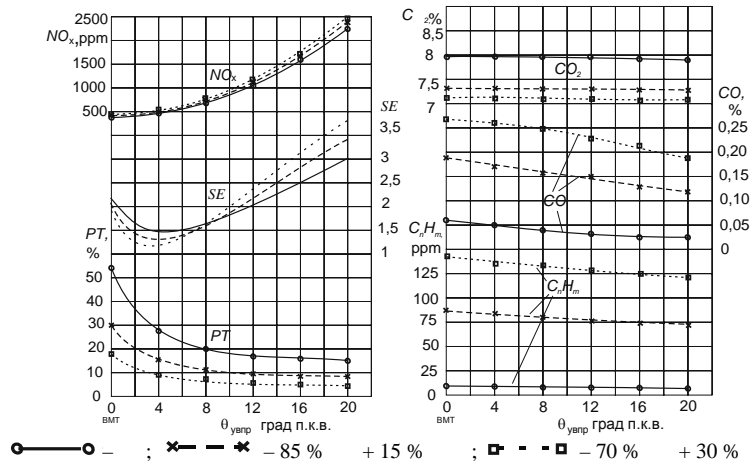
$\theta = 4^\circ$   $NO_x = 465,7$  ppm,  $\theta = 20^\circ$   $NO_x = 2245$  ppm.  
15 %

2245 2347 ppm, . . 6,8...4,5 % .  $\theta = 0^\circ$  410 438 ppm,  $\theta = 20^\circ$

30 %  
 :  $\theta = 0^\circ$  410 457 ppm,  $\theta = 20^\circ$  2245 2415 ppm,  
 . . . 11,5...7,6 %  
 , 29,4 8 % 17,6 4,7 % 15 % 30 % -  
 , . . . 6,5...24,6 % 9,8...36,4 % .  
 SE  
 1,46  $\theta = 4...5^\circ$  SE = 1,28, SE = 1,16  
 15 30 %  
 = 3,5° 30 % = 4,5°, 15 %  
 = 3,0°  
 0,05 0,26  $\theta = 4^\circ$   
 62 % 37 30 % 15 % 30 %

(0,05...0,07 %)

2, 15 30 % 0,6 0,8 %  
 2 , ,  
 , -  
 , -



. 4.2.

4 11,0/12,5  
 n = 1800 <sup>-1</sup>

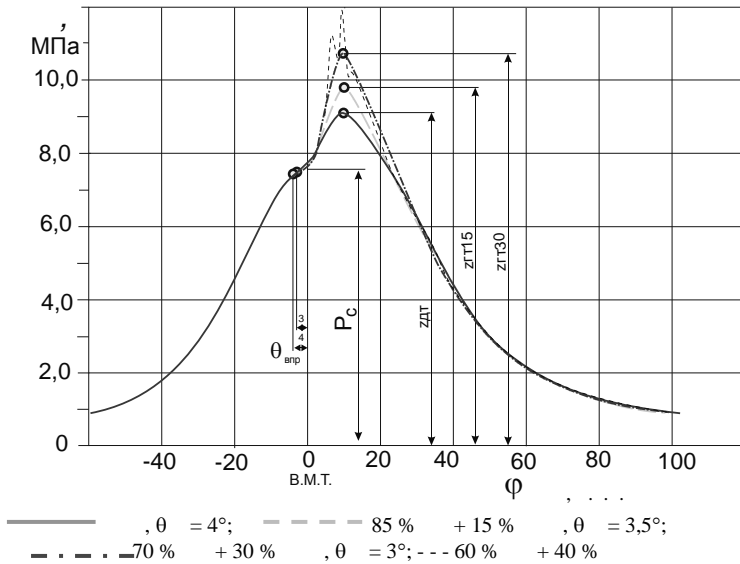
$C_nH_m$

2,2 ppm

$\theta = 20^\circ, 30\%$  ( $137 \text{ ppm}$ ) ( $85 \text{ ppm}$   $\theta = 0^\circ, 72,6 \text{ ppm}$   $\theta = 0^\circ, 120 \text{ ppm}$   $\theta = 20^\circ$ )

4 11,0/12,5

$n = 1800$  <sup>-1</sup>  
4.3.



4.3.

$n = 1800$  <sup>-1</sup> 11,0/12,5 (-245.5S2)

$P_z = 9,10$  ,  $\theta = 3,5^\circ$  ,  $P_z = 9,81$  ,  $\theta = 4^\circ$  ,  $P_z = 10,64$  ,  $\theta = 3^\circ$  ,  $P_z = 30$

40 %

( ) (knocks sensor),

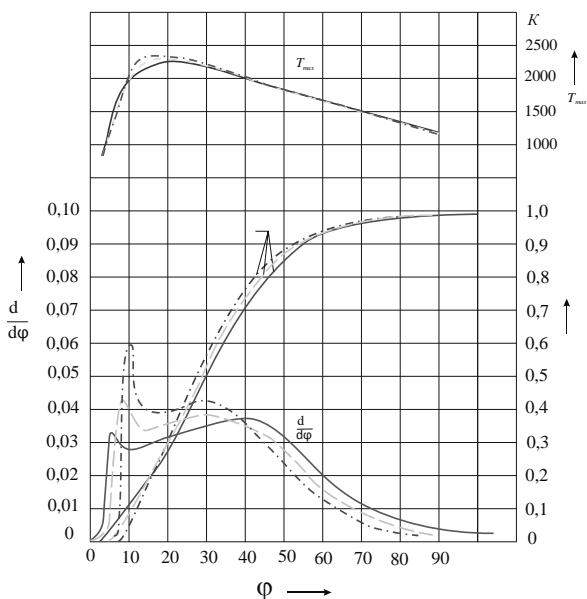
( . 4.4).

$T_{max}$

$\varphi = 13 \dots 20^\circ$ ,

$\varphi = 90^\circ$

1164 .



———— ,  $\theta = 4^\circ$ ; - - - - 85 % + 15 % ,  $\theta = 3,5^\circ$ ;  
 - . - . - . 70 % + 30 % ,  $\theta = 3^\circ$

. 4.4.

$n = 1800$

-1

4 11,0/12,5

$\chi$

$d\chi/d\varphi$

$\varphi > 45...50^\circ$

$\varphi = 100^\circ$

$\varphi = 85...90^\circ$

$n = 1800 \text{ }^{-1}$

0,332 / 15 % 30 % 0,203 / 0,248

4 11,0/12,5

#### 4.2. Влияние добавки газа на эффективные и экологические показатели дизеля 4ЧН 11,0/12,5

4 11,0/12,5

4 11,0/12,5

4,5

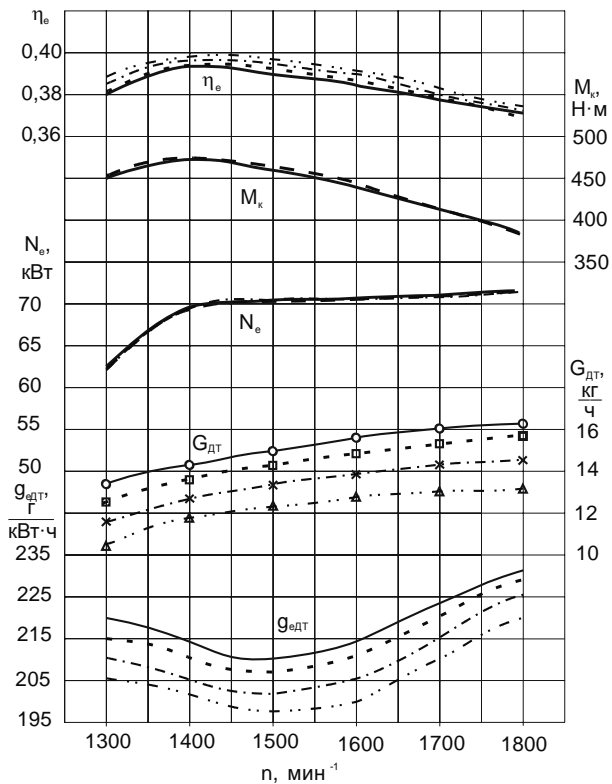
$N_e$

$M$

( G )

0,5 3,65 4,3...22,3 %

5 22 % [68].



○ — ○ - дизельное топливо (ДТ)    × — ···· × - ДТ + 13% газ  
 □ — ···· □ - ДТ + 5% газ                    △ — ···· △ - ДТ + 22% газ

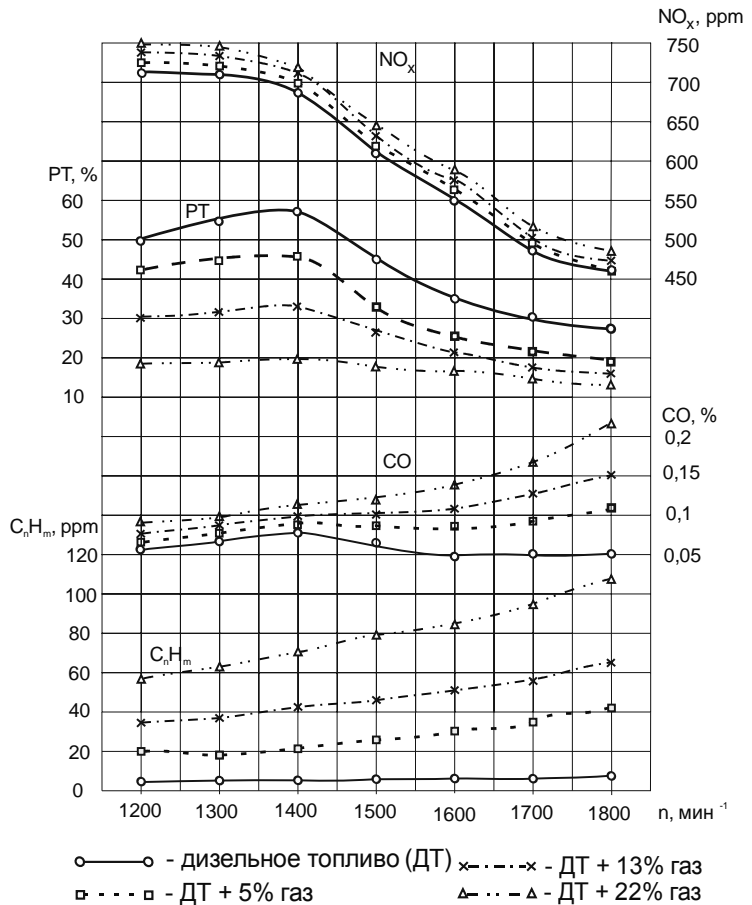
. 4.5.  
4 11,0/12,5

. 4.6.

10,5 %  
( . 4.6).

5,13 22 %  
 5; 7,7 14,8  
 (PT) 1,2; 2 3,3 [68].

16...65 % 5, 13 22 %  
 27,8; 42,2 51,5 %



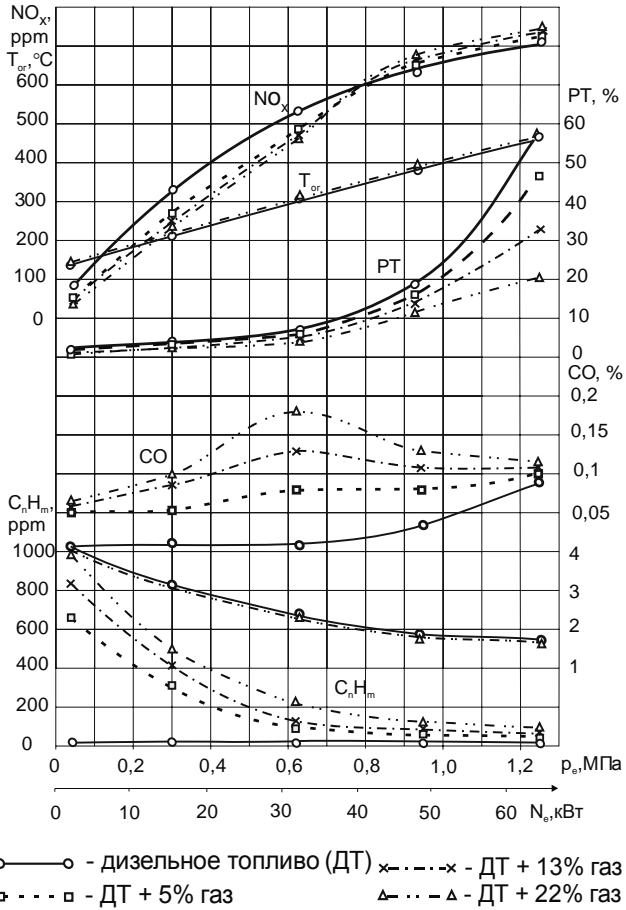
.4.6.

4 11,0/12,5

1400 1800 -1

. 4.7, 4.8.

(600 m)  $N_c = 47$  ,  $n = 1400$  -1  
720 m.



. 4.7.

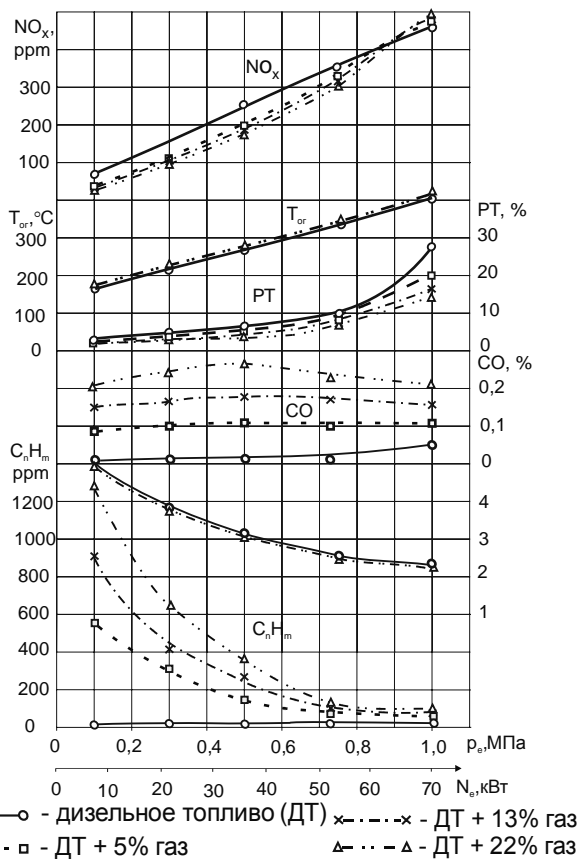
4 11,0/12,5

$n = 1400$  -1

$n = 1400$        $60\% (45)$   
 $n = 1800$        $22\%$   
 $64,7\% (4.7)$   
 $51,5\% [68]$

$P < 0,5$

(4.8).



4.8.

4 11,0/12,5

$n = 1800$

$N_e = 35,6$  , ,  $n = 1800$  <sup>-1</sup>  
 0,01 0,26 % ,  
 [68].

### 4.3. Результаты расчетно-теоретических исследований работы дизеля с добавками газового топлива

[194] , ,  
 , [68- , 69],  
 1200...1800 <sup>-1</sup>,  
 0,7...1,0 , 0...30 %  
 [68- ].  
 ( ) ,  
 , [69].

4 11,0/12,5 ( -245.5S2),  
 ( ) ,  
 ( ) ,  
 . 4.1 [69].  
 [128, 147].

#### 4.1. Факторы и уровни варьирования при реализации плана эксперимента Бокса-Бенкина второго порядка для трех факторов при определении оптимальных нагрузочных и скоростных режимах работы дизеля

	(-1)	0	(+1)
$P$ ,	$0,7 \cdot 10^6$	$0,85 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^6$
$n$ , <sup>-1</sup>	20	25	30
$G$ ,	0	0,15	0,30

$G$ , (0,0016...0,0039 / );  $\eta$   
 (0,3698...0,41),  $C$  (0,065...0,233) .  
 «Statgraphics»  
 18» «Microsoft Excel».

**4.2. Матрица плана эксперимента Бокса-Бенкина второго порядка для трех факторов и значения критериев оптимизации**

/	$P_e$	$n_e^{-1}$	$C_e$		$G_e$ /	$G$
1	0,0	0,0	0,0	0,3964	0,0025	0,0960
2	-1,0	-1,0	0,0	0,3781	0,0016	0,0930
3	1,0	-1,0	0,0	0,3936	0,0022	0,1800
4	-1,0	1,0	0,0	0,3698	0,0026	0,0790
5	1,0	1,0	0,0	0,3845	0,0036	0,1480
6	-1,0	0,0	-1,0	0,3973	0,0026	0,0750
7	1,0	0,0	-1,0	0,3936	0,0036	0,2330
8	0,0	0,0	0,0	0,3964	0,0025	0,0960
9	-1,0	0,0	1,0	0,3888	0,0018	0,0650
10	1,0	0,0	1,0	0,4110	0,0025	0,1290
11	0,0	-1,0	-1,0	0,3849	0,0024	0,1830
12	0,0	1,0	-1,0	0,3752	0,0039	0,1460
13	0,0	-1,0	1,0	0,3989	0,0017	0,1140
14	0,0	1,0	1,0	0,3944	0,0028	0,0985
15	0,0	0,0	0,0	0,3964	0,0025	0,0960

$F$ -  $P = 0,95$ ,  
 $t$ -  
 [2, 41, 136].

$$C_e^2, P_e^2, n_e \cdot C_e, P_e \cdot n_e, \quad (4.1)$$

$$\eta_e = 0,397129 + 0,0060875 \cdot P_e - 0,00395 \cdot n_e + 0,0052625 \cdot G + 0,006475 \cdot P_e \cdot G - 0,0122036 \cdot n_e^2. \quad (4.1)$$

. 4.9.

. 4.9.

$$n = 24,2^{-1} \cdot 0,41 \cdot P_e = 1,0 \cdot 10^6 ; G = 0,30$$

(4.1)

$$F- P = 0,95$$

t- 0,05, , -

$$P_e^2, n^2, (4.2) -$$

G :

$$G = 0,0025 + 0,0004125 \cdot P_e + 0,000625 \cdot n - 0,0004625 \cdot G + 0,0001 \cdot P_e \cdot n - 0,000075 \cdot P_e \cdot G - 0,0001 \cdot n \cdot G + 0,0001625 \cdot G^2. (4.2)$$

. 4.10.

. 4.10.

$$G = 0,282 \cdot n = 20^{-1} \cdot 0,0014 \text{ / , } P_e = 0,7 \cdot 10^6 \text{ ,}$$

$$F- \quad P = 0,95 \text{ ,}$$

$$t- \quad .$$

$$, \quad P_e^2, n \cdot C, P_e \cdot n$$

$$(4.3) \quad C \quad -$$

:

$$C = 0,101885 + 0,04725 \cdot P_e - 0,0123125 \cdot n - 0,0288125 \cdot G -$$

$$- 0,0235 \cdot P_e \cdot G + 0,0187019 \cdot n^2 + 0,0192019 \cdot G^2. \quad (4.3)$$

C

. 4.11.

. 4.11.

(C)

F-

$P = 0,95$

,

t-

C

0,052

$$P_e = 0,7 \cdot 10^6, G = 0,171 \quad n = 26,6^{-1}.$$

→ 1,0

(4.1)–(4.3)

*D-optium*

$$\left\{ \begin{array}{l} e = 0,397129 + 0,0060875 \cdot P_e - 0,00395 \cdot n + 0,0052625 \cdot C + \\ + 0,006475 \cdot P_e \cdot C - 0,0122036 \cdot n^2; \\ G = 0,0025 + 0,0004 \cdot P_e + 0,00062 \cdot n - 0,00046 \cdot G + \\ + 0,0001 \cdot P_e \cdot n - 0,000075 \cdot P_e \cdot G - 0,0001 \cdot n \cdot G + \\ + 0,00016 \cdot G^2; \\ C = 0,101885 + 0,04725 \cdot P_e - 0,0123125 \cdot n - 0,0288125 \cdot G - \\ - 0,0235 \cdot P_e \cdot G + 0,0187019 \cdot n^2 + 0,0192019 \cdot G^2 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} e \rightarrow \max \\ G \rightarrow \min \\ C \rightarrow \min \end{array} \right\}. \quad (4.4)$$

. 4.12.

. 4.12.

*D-optium*

*D-optium* = 0,8

$P_e = 0,88 \cdot 10^6$  ,  $n = 23,4^{-1}$  ,  $G = 0,30$ .

*D-optium*

$P_e$  ,  $n$  ,  $G$

$\eta$  ,  $G$  ,  $C$ .

. 4.3.

**4.3. Факторы и уровни варьирования при реализации плана эксперимента Бокса-Бенкина второго порядка для трех факторов при определении регулирования подачи газа**

	(-1)	0	(+1)
$\eta$	0,3698	0,3904	0,411
$G$	0,0016	0,00275	0,0039
$C$	0,065	0,149	0,233

-

*D-optium*

. 4.4.

**4.4. Матрица плана эксперимента Бокса-Бенкина второго порядка для трех факторов и значения критерия *D-optium***

/	$\eta$	$G$	$C$	<i>D-optium</i>
1	0,0	0,0	0,0	0,984517
2	-1,0	-1,0	0,0	0,787547
3	1,0	-1,0	0,0	0,910924
4	-1,0	1,0	0,0	0,93372
5	1,0	1,0	0,0	0,796247
6	-1,0	0,0	-1,0	0,954229
7	1,0	0,0	-1,0	0,894832
8	0,0	0,0	0,0	0,984517
9	-1,0	0,0	1,0	0,876407
10	1,0	0,0	1,0	0,780844
11	0,0	-1,0	-1,0	0,976095
12	0,0	1,0	-1,0	0,785157
13	0,0	-1,0	1,0	0,816138
14	0,0	1,0	1,0	0,951148
15	0,0	0,0	0,0	0,984517

(4.5)

*D-optium*

$$D-optium = 0,959005 - 0,063293 \cdot \eta_e^2 - 0,0652125 \cdot \eta_e \cdot G - 0,0577365 \cdot G^2 + 0,081487 \cdot G \cdot C. \quad (4.5)$$

*F*-

$P = 0,95$

*t*-

(4.5)

*D-optium*

. 4.13.

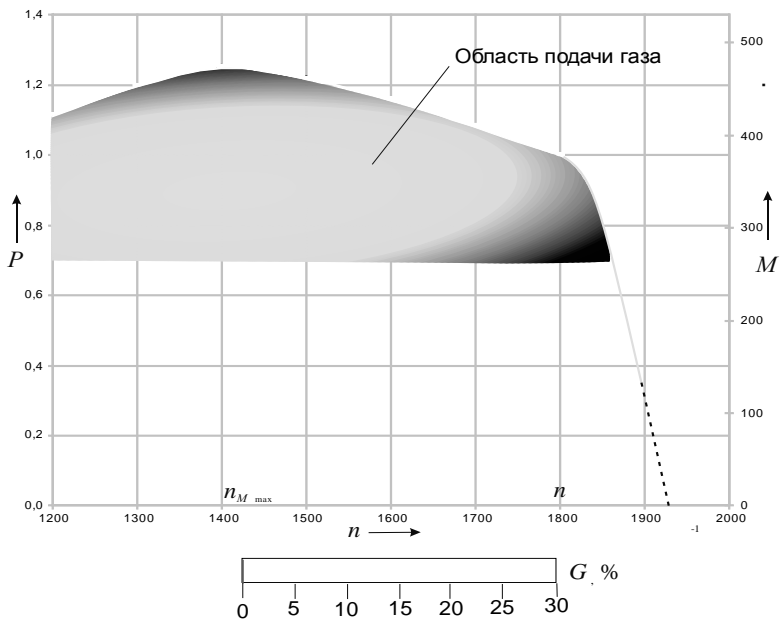
,  
 $G = 30 \%$   
 $n = 24 \dots 22,5^{-1}$   
 4 11,0/12,5 ( -245.5S2),

$P_e = 0,82 \dots 0,94 \cdot 10^6$  ;

. 4.13.

*D-optium*

,  
0,8...1,0 ;  
24,0...28,2 %  
1200...1500<sup>-1</sup>.  
1400...1700<sup>-1</sup>. 12...20 %  
,  
0,6...0,70  
10...15 %  
7...12 %  
1350...1750<sup>-1</sup>. 20...30 %  
0,7...0,85 ,  
, 0,7...0,80 ,  
4 11,0/12,5  
30 %  
( . 4.14).  
1000...1600<sup>-1</sup>  
1600...1880<sup>-1</sup>.



. 4.14.

4 11,0/12,5

#### 4.4. Результаты экспериментальных исследований по выбору места подачи ГТ для дизеля 4ЧН 11,0/12,5

4 11,0/12,5

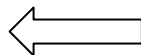
. 4.15, 4.16.

4.16

12...40

80  
3,2...6,2 %

$a$



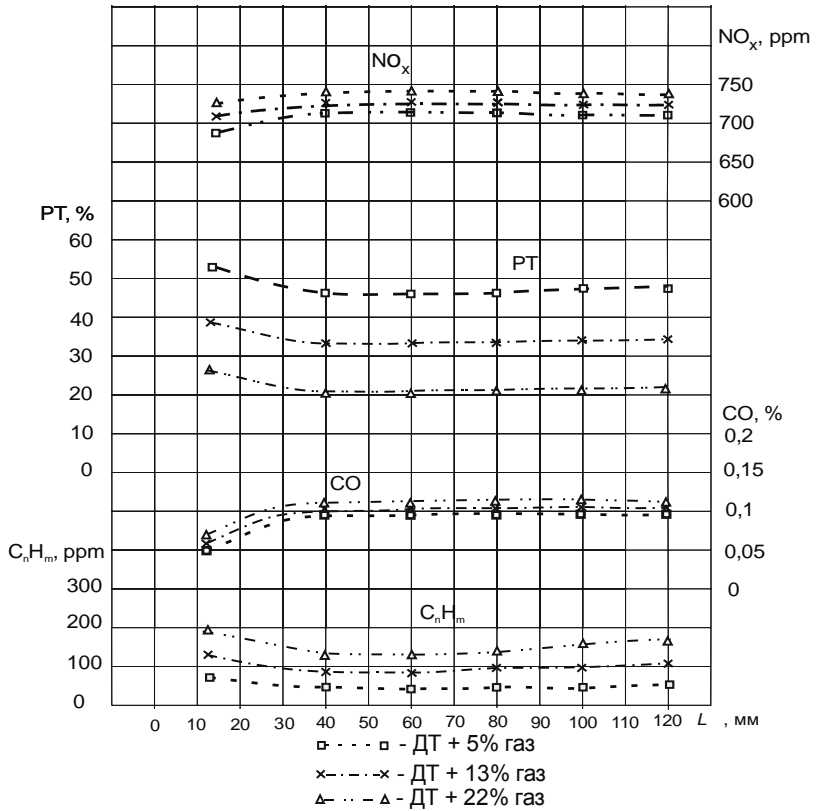
$b$

.4.15.

:  $a -$

-245.5

;  $b -$



. 4.16.

( 4 11,0/12,5  $n = 1800$   $^{-1}$  )

40...80

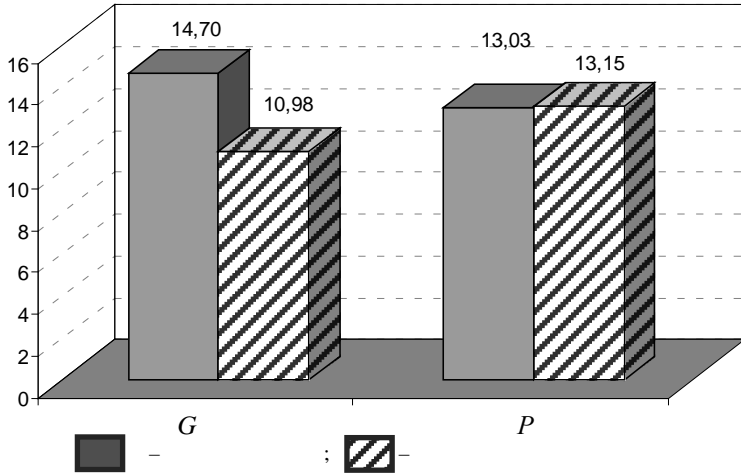
#### 4.5. Результаты эксплуатационных испытаний трактора «Беларус-922» при работе с добавками газового топлива

14,3...14,7 11,2...11,4 /

21,6...22,4 %

. 4.17.-4.18.

G , /



. 4.17.

-3-35

« -922»

3-35

- 13,15

« -922» + 13,03

« -922» +

-3-35 1,90 %,

(43,33 / ) 1,95 %

(42,50 / ).

15,64 11,68 / , . . 25,3 %.

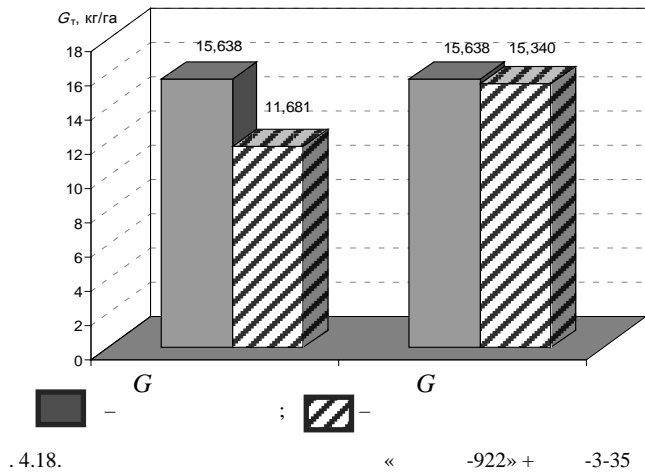
-3,6-01

« -922» + 10,74

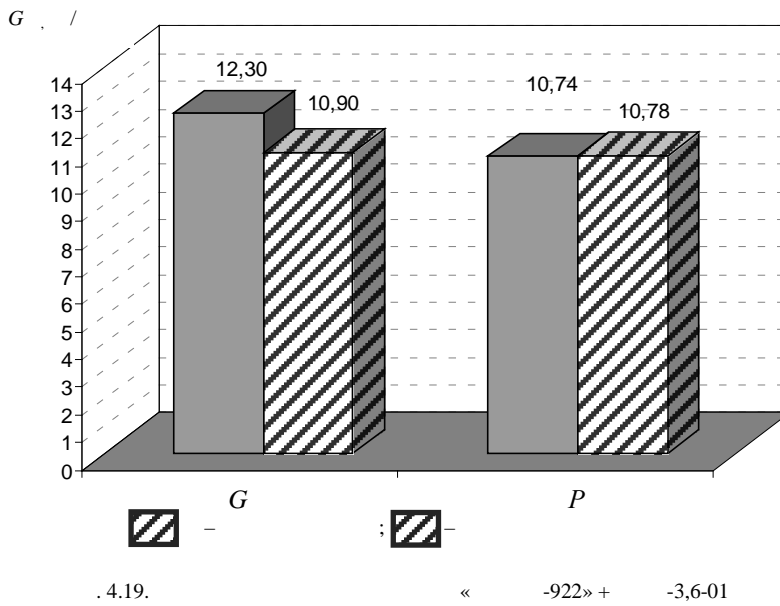
- 10,78 ,

12,3

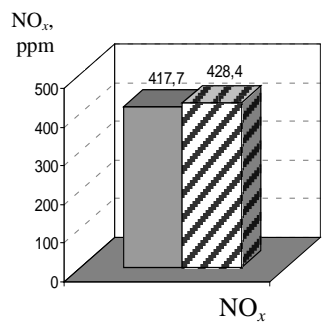
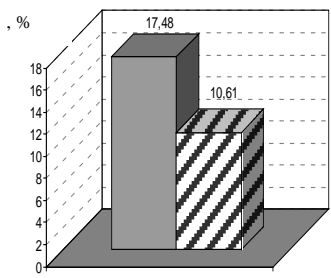
10,90 / , . . 11,4 %.



. 4.19, 4.20.

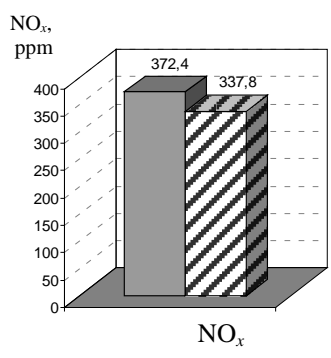
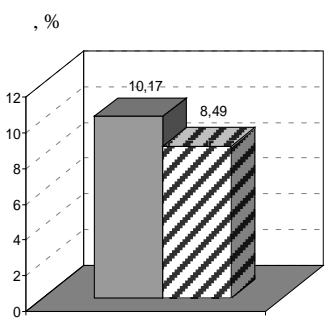






. 4.21.  
« -922»,

-3-35



. 4.22.  
« -922»,

-3,6-01

« -922»

16,5 %

-3,6-01  
- 9,3 %.

#### 4.6. Выводы по главе 4

1.				4	11,0/12,5	-
			0,5°	10 %		-
			30 %			-
			$\theta_{\text{увпр}}^{\text{опт}} = 4^\circ$ ,	15 %	$\theta_{\text{увпр}}^{\text{опт}} = 3,5^\circ$	-
	30 %		$\theta_{\text{увпр}}^{\text{опт}} = 3,0^\circ$ .			-
2.	$P_z$ ,	7,8	16,9 %	15	30	.
4	11,0/12,5					-
3.	1200	-1.	0,7			-
				$t$ -		-
			$F$ -		$p = 0,95$	-
4	11,0/12,5	( -245.5S2),			20...30 %	-
4.	0,8...1,0			1400...1750	-1.	-
				4	11,0/12,5	-

40...80 , -

5. « -922», -

14,3...14,7 11,2..11,4 / , -

11,68 / ), -3-35 25,3 %, ( 15,64 39,3 %, 2,6 %.

-3,6-01 - 11,3 %, ( 4,71 4,18 / ), - 16,5 %, 9,3 %.



$i$ -

$$\eta_i = (C_{i1} - C_{i2}) / C_{i1} \cdot 100 \%, \quad (5.3)$$

$C_{i1}, C_{i2}$  – ,  $i$ -

%.

. 5.1.

### 5.1. Стоимость элементов системы подачи газового топлива [193]

	1	.	1500
	1	.	1200
	1	.	1290
	1	.	60
	2,5	.	150
	1	.	40,2
	1	.	60000
	1	.	
	1	.	
	1	.	
( , , )	1	.	
	4	.	690
	4	.	360
	3	.	360
	1	.	900
	1	.	1140
	2	.	600
...			68 290

[30].

$$= \gamma \cdot \sigma \cdot f \cdot M, \quad / , \quad (5.4)$$

$\gamma$  –

$\sigma$  –

$f = 10$ ;
   
 $M = \dots$

$$M = \sum A_i \cdot m_i \tag{5.5}$$

$A_i = \dots$

$$A_i = a_i \cdot a_j \cdot \dots \tag{5.6}$$

$a_i = \dots$

[30].

[153]

. 5.2.

$$= (G - G') \cdot -G \cdot + \dots \tag{5.7}$$

$G - G' = \dots$

$$= \frac{\cdot r}{100}, \quad (5.8)$$

$r = 11,5 \%$

**5.2. Техничко-экономические показатели и результаты расчета экономической эффективности применения системы подачи газового топлива [153]**

		+
		-245.5S2
$C_1$ , .	-	68 290
$NO_x$ , ppm	470	-
$NO_x$ , ppm	-	490
, %	28,0	-
, %	-	13,0
$C_nH_m$ , ppm	5	-
$C_nH_m$ , ppm	-	114
	1,0	1,0
l	76,38	76,38
	1000	1000
$C_2$ /		785,3
		69075,30
		53,6
$K$ $C$ , /%		6314,1
(1000 -)	/1	31224

$$G = G \cdot H, \quad (5.9)$$

$G -$  , / . -

:

$$G' = G + \cdot H , \quad (5.10)$$

$$G = G \cdot H , \quad (5.11)$$

$G + -$  , ; -

$G -$  , -

- , . -

### 5.3.

#### 5.3. Технико-экономические показатели и результаты расчета экономической эффективности применения системы подачи газового топлива на дизеле

		-	68290
		-	785,3
		1000	1000
		10000	10000
1		76,38	76,38
1		-	45,22
	$G$	15900	12402
		1214442	947265
		-	3498
	$G$	-	3520,8
			159211
		1214442	1106476
			107966,00
	/		107,97
		-	31224,00
		-	131576,36

4 11,0/12,5, -

107,97 / .  
 31224 ,  
 100352,36 . 1000 ( 2023 .) -  
 22 %.

### 5.1. Выводы по главе 5

1.  
 22 %, 107,97 / , -  
 100352,36 .

2.  
 31224 . 131576,36 .  
 1000 ( 2023 .).



[106].

[194].

5.

4 11,0/12,5

30 %

( -245.5S2)

15 %  $\theta_{\text{убп}}^{\text{опт}} = 3,5^\circ$

$\theta_{\text{убп}}^{\text{опт}} = 4^\circ$

$\theta_{\text{убп}}^{\text{опт}} = 3,0^\circ$ .

15 % 30 %

$P_z$ , 7,8 % 16,9 %

[160].

4 11,0/12,5 ( -245.5S2), 20...30 %

0,8...1,0 1400...1750  $^{-1}$  [112].

4 11,0/12,5

40...80

[115].

« -922»,

14,3...14,7 11,2...11,4 / ,

-3-35 25,3 %, ( 15,64 39,3 %.

11,69 / ),

-3,6-01 11,3 %, ( 4,71 4,18 / ),

16,5 %, 9,3 % [75].

6.

4 11,0/12,5

22 %

107,97 / .

131576,36 .. 31224 ..

- 100352,36 . 1000 ×

[105, 153].

1. . . . . : . . . . . BY 9959 / . . . . . 15.11.2013.
2. . . . . / . . . . . -2- . . . . . , 1976. – 279 .
3. [ . . . . . ] – . . . . . , 2012. – 376 .
4. . . . . . MGT 5 / MAHA Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co, Allgäu, 2004. – 33 .
5. . . . . Statgraphics Plus 5.1 . . . . . / . . . . . - . . . . . , 2012. – 32 .
6. . . . . : . . . . . / . . . . . - : . . . . . , 2008. – 328 .
7. . . . . / . . . . . . . . . . - : . . . . . , 2010 – 305 .
8. . . . . / . . . . . , . . . . . - : . . . . . , 1969. – 383 .
9. . . . . : . . . . . / . . . . . - / : . . . . . , 2001. – 53 .
10. . . . . : . . . . . , 2010. – 26 .
11. . . . . , 2022, . 15, 8, . 931–939, doi: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0428>.
12. . . . . Bosch . . . . . - Bosch / . . . . . , 2012. – 25 .
13. . . . . / . . . . . // . . . . . + . . . . . - 2015. – 9 (102). – . 18–19.
14. . . . . : . . . . . -160: . . . . . : 05.20.01 / . . . . . - . . . . . , 2009. – 140 .
15. . . . . , 1971. – . 1: . . . . . -428 .
16. . . . . : . . . . . : 05.04.02. / . . . . . ; . . . . . , 2001. – 19 .
17. . . . . / . . . . . // . . . . . - : . . . . . 52- . . . . . / . . . . . - 1997. – . 3. – . 65.

18. / . . . : - .8.- : - ,2010.- .13-16.
19. , . . . ,2020, .11, 1. URL: <https://ejournal.pnu.edu.ru/ejournal/pub/articles/2639/>
20. , . . . / . . . - .,1972.-502 .
21. , . . . / . . . , . . . : . . . - . : ,2007.-400 .
22. / . . . , . . . , . . . - . : 1987.-368 .
23. , . . . / . . . , . . . - . : ,1988.-224 .
24. , . . . / . . . , . . . - . : ,1965.-465 .
25. , . . . / . . . , . . . - . . . - . : ,1981.-208 .
26. . / . . . [ . . . ]// . . . -2012.- 1.- .44-47.
27. . . . , . . . // / . . . , . . . -2023.- 6.- .89-98.
28. , . . . / . . . -2- . . . . - . : ,1981.-263 .
29. , . . . - . : ,1977.-277 .
30. . . . , . . . / . . . , . . . [ . . . ]- . : ,1986.-96 .
31. - . : ,1968.-204 .
32. / . . . [ . . . ]- .,1992.-213 .
33. / . . . [ . . . ]- . : ,1989.-216 .
34. : , . . . ,15-17 . . . 2000 .- .,2000.-418 . (IANGV),
35. ( . . . 1): 27578-87. - . : ,2004.-149 .
36. : 20448-88; . . . 01.01.92. - . . . ,2000.
37. , . . . - . : ,1977.-196 .

38. / . . . . . - . . . . . , 1993. - 330 .
39. PM10 / . . . . . , . . . . . [ . ] // . - 2015. - 17, 5 (2). - 646-651.
40. . . . . . : 11.00.11, 05.04.02 / . . . . . , 1994. - 19 .
41. . . . . . , 1979.- 200 .
42. . . . . . 4 11,0/12,5 : . . . . . : 05.04.02 / . . . . . , 2009. - 18 .
43. . . . . . : . . . . . : / . . . . . , 2016. - 260 .
44. . . . . . : , 2004. - 344 .
45. . . . . . / . . . . . , . . . . . - .
46. . . . . . , 1979. - 479 .
47. // . . . . . - . . . . . , 1989. - 105-115. / . . . . . - . . . . . , 1977. - II: - 384 .
48. . . . . . - . . . . . / . . . . . - . . . . . , 1989. - 200 .
49. . . . . . / . . . . . [ . ]; . . . . . , 1984. - 384 .
50. - 4- . . . . . : . . . . . - 3- . . . . . - . . . . . , 1985. - 456 .
51. / . . . . . , . . . . . - 4- . . . . . - . . . . . , 1983. - 372 .
52. . . . . . - 3- . . . . . - . . . . . : . . . . . / . . . . . , 1980. - 288 .
53. : : 3 . / . . . . . [ . ]; . . . . . - . . . . . , 2005. - 2: . . . . .
54. . . . . .
- 4 11,0/12,5 ( -240) : . . . . . . . . . . : 05.04.02 / . . . . . , 2003. - 19 .
55. : 18509- . . . . . , 1999. - 52 .
88. - : . . . . . , . . . . . ,

56. 1,4. – : . -  
, 1987. – 4 .
57. MDO2-LON /  
/ MAHA Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co, Allgäu, 2005. – 68 .
58. ,  
-  
-  
: 96. – . 05.10.2012. – : -  
, 2013. – 117 .
59. , . . : , -  
, 2005. – 207 . / . . . . - : ACT:  
, 2005. – 207 .
60. , . . :  
/ . . . . : - 2011. – 598 .
61. , . . -  
// +  
- 2003. – 5 (11). – .64-69.
62. , . . :  
/ . . . . , . . [ .];  
. – ., 1986. – 40 .
63. , . . //  
: . . :  
. « » , 2013. – , 2013. –  
. 180–182.
64. , . . / . . . - : ,  
1967. – 88 .
65. , . . / . . , . . -  
// : . .  
. – , 1986. – 234 .
66. , . . / . . . -  
2- „ - : , 1981. – 160 .
67. , . . / . . -  
. – ., 2005. – 83 .
68. , . . //  
. – 2023. – 8. – . 117–125.
69. / . . , . . , . . -  
// . – 2019. – 2. – . 239–243.
70. , . . / . . //  
, . . : . . . -  
- , 1989 – . 81–82.
71. , . . // . – 2013. – 3. -  
. 110–116.

72. / . . . . . 1 6,8/5,4 -  
 .-2016.- 4.- .115-117. , . . . . . //
73. , . . . . . /  
 . . . . . //
- [ .].- : ,2019.- .4.- .171-175.  
 74. , . . . . . -  
 : ,2012.-86 . / . . . . . -  
 75. , . . . . . / . . . . . -  
 // .-2020.- 4- .36-40. : . . . . . / . . . . . -  
 76. , . . . . . ,2008.-312 . : . . . . . / . . . . . -  
 77. , . . . . . / . . . . . ,  
 . . . . . // 2009 .: 2 . / . . . . . ; :  
 . . . . . [ .].- ,2009.- .2.- .57-62. : . . . . . ; :  
 78. , . . . . . / . . . . . // -  
 . . . . . ,2-3 2015 . / . . . . . - :  
 ,2015.- .95-101. : . . . . . -  
 79. / . . . . . IX , . . . . . // - ,2016.- .17. -  
 .124-128. : . . . . . IX . . . . . - ,2016.- .17. -
80. , . . . . . / . . . . . ,  
 . . . . . // : . . . . . ,2014.-  
 .16-19. : . . . . . - : - ,2014.-
81. , . . . . . / . . . . . // , -  
 .50- : . . . . . // ; :  
 . ( . . . . . ) [ .].- ,2018.- .29-32. ; :  
 82. , . . . . . / . . . . . //  
 .-2015.- 1.- .121-126. : . . . . . -  
 83. / . . . . . , . . . . . - :  
 ; : . . . . . ,2014.-421 . : . . . . . -
84. / . . . . . // ,2016.- .121-123. -  
 : . . . . . - ,2016.- .121-123. -

85. . . . / . . . . - :  
, 2012. – 212 .
86. . . . : - . -  
/ . . . . - : , 2008. – 261 .
87. . . . :  
/ . . . // . - 2003. – 1. – . 12–14.
88. . . . - /  
// . - 2001. – 12. – . 10–13.
89. . . . :  
/ . . . . , . . . . - 4- . . . . : . . . . , 2008. – 496 .
90. . . . / . . . . -  
. . . . . - . . . . , 1984. – 239 .
91. . . . -  
. - : . . . . , 1989. – 416 .
92. . . . /  
. - : . . . . , 1978. – 472 .
93. . . . -  
. . . . . , 2022, 12, . 87–106, doi:  
<https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-12-87-106>
94. . . . . , 2017. – 2. – . 7–10.
95. . . . /  
. - . . . . , 2000. – 256 .
96. . . . -  
/ . . . . - : . . . . , 1999. – 180 .
97. . . . « » - . . . . . 6. -
- 1975.
98. . . . +  
/ . . . // . - 2007. – 3 (33). – . 38–41.
99. . . . : . . . . : 05.02.13 / . . . . -  
. . . . , 2010. – 19 .
100. . . . -  
/ . . . . - : . . . . , 2002. – 280 .
101. . . . -  
: . . . . / . . . . , . . . . - : . . . . ,  
2013. – 280 .
102. . . . :  
/ . . . . [ . . . ]; . . . . . - . . . . , 2005. – 479 .
103. . - : ( ), 2000. – 312 .
104. . . . -  
: . . . . « » , . . . . , 996. -
- 245 .

105. / . . . . -  
 // .-2023.- 2.- .185-189.
106. // .-2015.- 4.- .128-136.
107. // : -  
 : . . . . « ». 2013.- .188-189.
108. // . - . . . . -  
 : ,2011.- .155.
109. // : . . . . / : . . . .
- [ .].- : ,2019.- .4.- .99-103.
110. // : . . . .
- XVI  
 2016.- .58-61.
111. // .-2017.- 2.- .127-131.
112. // .-2022.- 4.- .168-172.
113. // : . . . . / : . . . . ( . . . ) [ .].- : ,2020.-  
 .5.- .142-147.
114. // : , , « ». 2013.- .2:  
 : . . . . : 2 .- : .41-44.
115. 4 11,0/12,5 - /  
 // .-2021.- 1.- .23-30.
116. // : . . . . / : . . . . ( . . . ) [ .].- : ,2023.-  
 .8.- .292-296.
117. // : . . . . / : . . . . IV  
 ,2013.- .125-129.
118. // : . . . .

XXI : III . - . - , 2014. -  
. 184–185.  
119. / . . . // , 22–23 2010 . ;  
[ . ]. - , 2010. - . 42–43.  
120. / . . . // -  
2013: . - , 2013. -  
. 310–311.  
121. / . . . : -  
// « »,  
2016. - . 26–31.  
122. / . . . // VII -  
. 2014. - 3. - . 60–62.  
123. EGR DPF / . . . // - 2016:  
III  
2016. - . 148–149.  
124. / . . . - . :  
, 1980. - 151 .  
125. / . . . ,  
. . . . - . : - . . . . , 2002. - 376 .  
126. / . . . - . : - . . . . , 2000. -  
296 .  
127. / . . . // . - 2011. - 2 (244). - 56 .  
128. / . . . - . : ,  
1980. - 168 .  
129. / . . . ,  
. . . . // . - 2017. - 3. - . 35–44.  
130. / . . . : ,  
2015. - 64 c.  
131. . - 2020. - 2. - . 87–92, doi: <https://doi.org/10.34046/aumsuomt95/15>.  
132. [ . ] - :  
<https://rad.org.by>. - : 24.08.2022.  
133. /  
. . . . - . : , 1980. - 384 .

134. , . . . / . . . . - :  
 - , 2000. - 80 .

135. , . . .  
 . - 2020. - 4. - . 71-76.

136. , . . . /  
 . . . . - : , 1965. - 310 .

137. , . . . -  
 4 11,0/12,5  
 : . . . . : 05.04.02 / . . . . - ,

2007. - 160 .

138. /  
 . . . . , . . . . , . . . . //  
 , 1997. - . 83-86.

139. / . . . . , . . . . - :  
 . 1989. - 400 .

140. -

17.2.2.02-98. - :  
 , 1998. - 9 .

141. « . . . » - , 2012. « -

142. , . . . // . . . . , . . . . -

2015660120 22.09.2015.

143. , . . . -  
 : . . . . - . . . . : 05.04.02. / . . . . ; . . . -  
 , 2011. - 39 .

144. , . . . / . . . -  
 . - . , 1973. - 52 . ( . . . . / - . . . . ,  
 . . . . - ) .

145. , . . . -  
 . - . 2- , . . . : / . . . . - : . . . . ,

1973. - 236 .

146. 96 (02) / 3. . - .

2012. - 445 .

147. , . . . / . . . ,  
 . . . . - : « . . . » , 2005. - 288 .

148. , . . . 4 11,0/12,5  
 : . . . . : 05.04.02 / . . . . - , 2006. - 19 .  
 149. « -920, 922». - :  
 , 2011. - 144 .

150. . . . -242, -243, -245 -  
 . - : , 2009. - 80 .

151. . . . -245S2, -245.2S2, -245.5S2, -  
 245.16S2, -245.16 S2, -245.42S2, -245.43S2. - : ,  
 2010. - 104 .

152. . . . / . . . . . -  
. 2- . - . : , 1953. – 240 .  
153.  
2018618558 . «  
« - »: 2018615642 : .  
04.06.2018: . 16.07.2018 / . . . . , . . . . [ .];

« » ( ).  
154. . . . , . . . . -  
. . . . , . . . . : . . . . /  
. . . . , . . . . , . . . . - :  
, 2015. – 347 .

155. : . BY 21904 / . . . . . – . 07.02.2018. -  
156. : . BY 8104 / . . . . , . . . . ,  
. . . . – . 03.01.2012. -  
157. : . BY 20669 / . . . . , . . . . , -  
. 28.09.2016.  
158. : . BY 12202 /  
. . . . , . . . . . – . 01.11.2019.  
159. : . BY 8107 / . . . . -  
. . . . . – . 03.01.2012.  
160. : . BY 8351 / . . . . -  
. . . . . – . 03.04.2012.  
161. : . BY 9079 /  
. . . . . – . 17.12.2012.  
162. : . RU 2687856 /  
. . . . , . . . . , . . . . . – .

16.05.2019.  
163. : . / . . . . -  
[ .]. – : , 2004. – 28 c.  
164. « » , 2005. – 432 . [ .]. . . . – . :  
« . . . . » , 2004. – /  
. . . . , . . . . . – : , 2004. –  
400 c.  
166. 4 11,0/12,5  
. : 05.04.02 / . . . . . – , 2009. – 19 . : . . . . .

167. / . . . . , . . . . // -  
: . . . . . – . , 1980. – . 75–76.  
168. : . RU  
2743350 / . . . . , . . . . , . . . . , . . . . . – .  
17.02.2021.





		.....	3
		.....	5
1.		.....	9
1.1.		.....	9
1.2.		.....	12
1.3.		.....	16
1.4.		.....	34
1.5.	-	.....	47
1.6.		.....	58
1.7.		.....	62
1.8.		.....	67
1.9.	1	.....	70
2.		.....	71
2.1.		.....	74
2.2.		.....	78
2.3.		.....	88
2.4.		.....	96
2.5.		.....	100
2.6.		.....	119
2.7.	2	.....	137
3.		.....	139
3.1.		.....	139
3.2.		.....	140
3.3.		.....	149
3.4.		.....	152
3.5.		.....	154
3.5.1.		.....	156
3.5.2.		.....	157
3.5.3.	-	.....	158
3.5.4.	-	.....	160
3.6.		.....	163
3.7.		.....	165
3.8.	3	.....	168
4.		.....	169
4.1.	4	11,0/12,5	.....
			169

4.2.	4	11,0/12,5.....	174
4.3.		- .....	179
4.4.	4	11,0/12,5.....	187
4.5.		« -922» .....	189
4.6.	4	.....	194
5.		.....	196
5.1.	5	.....	201
		.....	202
		.....	204

**Карташевич  
Мальшкин  
Плотников**

*Е. П. Савиц  
Н. Л. Якубовская*

24.10.2025. 60×84<sup>1/16</sup>.  
« » . . . 12,79. - . . . 10,98.  
100 . . .

1/52 09.10.2013.  
, 13, 213407, . . .

, 5, 213407, . . .