







"

"

( ) ) ,

1			
1	2	3	4
34	7	8	8 ;

**0 5 6 5 78 9 6 9 . 9 7 8,**

.

(. - ,

"

**5 7 . 9 7 7 5 8 9**

**0** "

1 .

3 ( 8 8 ) ,	( 8 8 ) ,	" . 8 8	8 . " . 1 . 3
8 34	. " - . 3 3 "2. 3 3 1 ( , 3 3 2 . 3 3 1 . 3 3 -	8 34 4 " 2. 3 3 1 ( , 3 3 8 34 3 2- 3 3 1 ( , 3 3 1 8 34 3 1. " 2 3 2 ( , 3 3 1 " 3	' . " " 3 3 3 " " - 1 3 3 " " 3 3 " . " 3 3 " " 3 1. " 2 2 " 1 - 1 2 " 2 - 2 2 " 2 - " 3 1 " 1 2- 3 " . " " 1 3



( ) ) ,			
- . / /			
1 . - / - / 1 2. -			
/ . ) )			
/ 34	7	8 /.	8 ;

	. - 3 3	. - 3
--	------------	-------

0, 7 69 9 . 9 7 8, 5 5 9

	/ /	. / /.	/	/
4	/	<p>8 34</p> <p>- / 1 2</p> <p>2 . 1</p> <p>. / 2</p> <p>1 . / 2 .</p> <p>- / / / 1</p> <p>. / / /</p>	4	.
	/	<p>8 34</p> <p>2 / / / 2 . 1</p> <p>2/ / / /</p> <p>1 1 2 2 . /</p> <p>1 / / 2 2 / 2</p> <p>2 / / / . 1</p> <p>2 / / 1</p>		.
	1	<p>8 34</p> <p>./ / / 1 2</p> <p>/ / / 2</p> <p>. / / /</p> <p>1 2 / /</p> <p>/ 1 2 .</p> <p>. / 1</p> <p>1 / . 2</p> <p>1 2/ / 2</p>		.
	1	<p>8 34</p> <p>/ / / / 2 - /</p> <p>8</p>		.





( ) ) ,

0 1 . 0 .			
. . . . . ) ) 0 1 2 . -			
3	5 67	8 9 .	8 ;

		3 3 . . 2 0 2 . 2 0 2 0 29555 0 1 . 1 3 2 3 . 3 . 2- . 0 1 5		9
5		8 3 2 9 2 2 2 . 9 2 . 0 2 1 2 1 9 1 9 5		9
. 5 .		8 3 2 . ( . 2 ,2 . 2 2 2 2 2 . 2 . 1 5		9
. 5		8 3 9 2 . - 2 2 1 2 1 1 1 - 1 2 . 5	2 37	9
		8 3 2		9





( ) + ) ,

<p>0 1 . 0 . / / - / - / 0 1 2. - / . ) + )</p>			
+ / 34	57 67	8 9 / . :::::::::::	8 ; < :::::

	<p>2 . / , &gt; 5 / 3 4/L2 =&gt; L5</p>	<p>+ , =2/L 4?</p>	<p>/ L5 / 3 / / . / / / 2 . / 3 , , , 3</p>	<p>, 6 7 / L 2 + , 6 C / L 2 &gt; ) , 7? / L 2 &gt;</p>
	<p>3 62= / L5B 4?&gt;/ 5 / 2 3 5 . . &gt;2 / 5</p>	<p>&gt;X/L =?&gt;</p>	<p>3 62= / L5B 4?&gt;/ 5 / 2 3 5 . . &gt;2 / 5</p>	<p>&gt;X/L =?&gt;</p>
	<p>9 2 1 &gt;&gt;/ 2 . 3 / 5 / 3 / / 2 , 9 . / ?/ L , 9 3 ?/ L , 9 . 3</p>	<p>, 72 , 62 , 62</p>	<p>B 4 1 &gt;2 =. 5 / / 4 = 3 / 2 / 2 / 3 / 5</p>	<p>3 &gt;</p>
?	<p>B . 4 X/ &gt; &gt;5 / 4/ . .</p>	<p>4 42? =&gt;2?</p>	<p>8 &gt; C / L5 2 . 2 3 / 2 / =&gt; 5 3 . / 3</p>	<p>4&gt;&gt;/ 3&gt;2 / L=</p>
C	<p>0 / / / 42 / 58 . 9 3 . . 1 2 3 / / / 3 / / 5 3 / / ?&gt; / L5 / . / 3</p>	<p>&gt;2 / L= =4C</p>	<p>/ . - / 3 C/ 2 / L a =2 / L=5 3 c 3 c / 4 58 - / . 2</p>	<p>c 6/L c / L=</p>



( ) + ) ,

$\frac{0}{1} \cdot \frac{0}{1} = \frac{0}{1}$			
$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$			
+	/	34	5 67
			8 9 / . ::::: :
			8 ; :::::

	0 / 5		/ 4 5	
6	$\frac{8}{2} = 4$ $\frac{3}{3} = 1$ $\frac{3}{3} = 1$	==? /	$\frac{2}{2} = 1$ $\frac{2}{3} = \frac{2}{3}$ $\frac{5}{3} = \frac{5}{3}$ $\frac{4}{2} = 2$ $\frac{8}{1} = 8$	$\frac{442}{7}$
7	$\frac{3}{3} = 1$ $\frac{3}{2} = \frac{3}{2}$ $\frac{2}{5} = \frac{2}{5}$ $\frac{2}{2} = 1$ $\frac{3}{3} = 1$ $\frac{58}{2} = 29$ $\frac{2}{3} = \frac{2}{3}$	, =3 a4= 3 a= , = / = / =	$\frac{4?}{1} = \frac{4}{1}$ $\frac{0}{4} = \frac{0}{4}$ $\frac{3}{5} = \frac{3}{5}$	$\frac{17}{?} = \frac{17}{?}$
	$\frac{2}{2} = 1$ $\frac{3}{3} = 1$ $\frac{3}{3} = 1$ $\frac{5}{3} = \frac{5}{3}$ $\frac{3}{3} = 1$ $\frac{h}{3} = \frac{h}{3}$	$\frac{42}{4} = \frac{42}{4}$ $\frac{442}{4} = \frac{442}{4}$ $=$	$\frac{4}{n} = \frac{4}{n}$ $\frac{5}{5} = 1$	n 4 /
4	$\frac{3}{3} = 1$ $\frac{4?}{1} = \frac{4?}{1}$ $\frac{0}{4} = \frac{0}{4}$	$\frac{17}{?} = \frac{17}{?}$ $\frac{?2}{?} = \frac{?2}{?}$	$\frac{4}{5} = \frac{4}{5}$ $\frac{5}{3} = \frac{5}{3}$	$\frac{4}{42} = \frac{4}{42}$



( ) ) ,

$\frac{0}{1} \cdot \frac{0}{1} = \frac{0}{1} \cdot \frac{0}{1} = \frac{0}{1}$			
$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$			
$\frac{1}{34}$	$\frac{54}{67}$	$\frac{8}{9}$	$\frac{1}{2}$

$\frac{5}{3}$	$\frac{3}{3}$
---------------	---------------

=			
..	4		=
4	$\frac{0}{1} \cdot \frac{6}{2} = \frac{0}{2}$ $\frac{7}{5} \cdot \frac{3}{02} = \frac{21}{10}$ $9 - 0 = 9$ $2 =$	$0 \ 2 /$	$\frac{2}{2} \cdot \frac{3}{3} = \frac{6}{6}$ $\frac{5}{3} \cdot \frac{3}{5} = \frac{15}{15}$ $\frac{24}{5} \cdot \frac{3}{3} = \frac{72}{15}$ $\frac{1}{4} \cdot \frac{5}{2} = \frac{5}{8}$ $\frac{9}{3} \cdot \frac{3}{5} = \frac{27}{15}$ $2 \cdot \frac{3}{5} = \frac{6}{5}$
=	$\frac{4}{5} = \frac{4}{5}$ $\frac{4}{3} = \frac{4}{3}$ $9 - 0 = 9$ $2 ?$	$2^7$	$\frac{4}{5} \cdot \frac{3}{5} = \frac{12}{25}$ $\frac{2}{3} \cdot \frac{3}{5} = \frac{6}{15}$ $5$
	$\frac{4}{5} \cdot \frac{9}{2} = \frac{36}{10}$ $9 \cdot 2 \cdot 4 = 72$	$2 \ 4 \ 4 ?$	$\frac{4}{5} \cdot \frac{9}{2} = \frac{36}{10}$ $2 = ? \cdot \frac{5}{9} = \frac{10}{9}$ $2 \cdot 4 = 8$
	$\frac{8}{2} \cdot \frac{3}{5} = \frac{24}{10}$ $\frac{4}{5} \cdot \frac{3}{3} = \frac{12}{15}$ $0 \cdot \frac{3}{8 \cdot 4/5} = 0$	$?? /$	$\frac{8}{2} \cdot \frac{3}{5} = \frac{24}{10}$ $\frac{4}{5} \cdot \frac{2}{3} = \frac{8}{15}$ $-4 \cdot \frac{3}{58} = -\frac{12}{58}$ $\frac{3}{8}$





( ) ) ,

$\frac{0}{1} \cdot \frac{0}{1} = \frac{0}{1} \cdot \frac{0}{1} = \frac{0}{1}$			
$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$			
$\frac{1}{34}$	$54 = 67$	$8 \cdot 9 = 72$	$8$

$\frac{2}{5} = \frac{1}{3}$	$4 = 2$	$\frac{8}{2} = \frac{4}{1}$	$42$
$\frac{1}{5}$		$58$	
		$\frac{9}{3} = 3$	
		$2 = 2?$	
		$= 4$	
		$= 1$	

$4$	$=$	$2 \cdot 9 = 18$	$2 = ?$
$8 \cdot 4 = 32$	$= 2?$	$\frac{2}{5} = \frac{1}{3}$	
$\frac{2}{5} = \frac{1}{3}$		$67 \cdot 7 = 469$	
$\frac{1}{5} = \frac{1}{5}$		$58$	
$\frac{1}{3} = \frac{1}{3}$		$\frac{2}{4} = \frac{1}{2}$	
$\frac{4}{5} = \frac{4}{5}$		$\frac{1}{5} = \frac{1}{5}$	
$\frac{1}{2} = \frac{1}{2}$		$0$	
$\frac{1}{4} = \frac{1}{4}$		$58$	
$\frac{1}{5} = \frac{1}{5}$		$\frac{2}{4} = \frac{1}{2}$	
$\frac{1}{3} = \frac{1}{3}$		$\frac{1}{5} = \frac{1}{5}$	
$\frac{1}{5} = \frac{1}{5}$		$1$	
$\frac{1}{3} = \frac{1}{3}$		$7$	
$\frac{1}{5} = \frac{1}{5}$		$44$	
$\frac{1}{3} = \frac{1}{3}$		$50$	
$\frac{1}{5} = \frac{1}{5}$		$1$	
$\frac{1}{3} = \frac{1}{3}$		$4 = 2?$	
$\frac{1}{5} = \frac{1}{5}$		$2$	



( ) ) ,

$\frac{0}{1} \cdot \frac{0}{1} = \frac{0}{1} \cdot \frac{0}{1} = \frac{0}{1}$			
$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$			
$\frac{1}{34}$	$\frac{54}{67}$	$\frac{8}{9}$	$\frac{1}{8}$

$\frac{1}{5} \cdot \frac{3}{5}$	$\frac{0}{1} \cdot \frac{2}{3}$	$\frac{2}{3} \cdot \frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
$\frac{4}{5} \cdot \frac{4}{5}$	$\frac{4}{5} \cdot \frac{4}{5}$	$\frac{4}{5} \cdot \frac{4}{5}$	$\frac{4}{5}$
$\frac{2}{5} \cdot \frac{4}{5}$	$\frac{2}{5} \cdot \frac{4}{5}$	$\frac{2}{5} \cdot \frac{4}{5}$	$\frac{2}{5}$
$\frac{5}{5} \cdot \frac{3}{5}$	$\frac{5}{5} \cdot \frac{3}{5}$	$\frac{5}{5} \cdot \frac{3}{5}$	$\frac{5}{5}$
$\frac{9}{5} \cdot \frac{2}{5}$	$\frac{9}{5} \cdot \frac{2}{5}$	$\frac{9}{5} \cdot \frac{2}{5}$	$\frac{9}{5}$

$\frac{4}{5}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{4}{5}$
$\frac{2}{3} \cdot \frac{3}{3}$	$\frac{2}{3} \cdot \frac{3}{3}$	$\frac{2}{3} \cdot \frac{3}{3}$	$\frac{2}{3}$
$\frac{24}{58} \cdot \frac{58}{58}$	$\frac{24}{58} \cdot \frac{58}{58}$	$\frac{24}{58} \cdot \frac{58}{58}$	$\frac{24}{58}$
$\frac{62}{5} \cdot \frac{5}{5}$	$\frac{62}{5} \cdot \frac{5}{5}$	$\frac{62}{5} \cdot \frac{5}{5}$	$\frac{62}{5}$
$\frac{1}{3} \cdot \frac{3}{3}$	$\frac{1}{3} \cdot \frac{3}{3}$	$\frac{1}{3} \cdot \frac{3}{3}$	$\frac{1}{3}$
$\frac{42}{5} \cdot \frac{5}{5}$	$\frac{42}{5} \cdot \frac{5}{5}$	$\frac{42}{5} \cdot \frac{5}{5}$	$\frac{42}{5}$
$\frac{5}{8} \cdot \frac{3}{3}$	$\frac{5}{8} \cdot \frac{3}{3}$	$\frac{5}{8} \cdot \frac{3}{3}$	$\frac{5}{8}$



( ) ) ,

0 1 . 0 .			
/ / - / 0 1 2. -			
/ . ) )			
/ 34	54 67	8 9 / . ::::: :	8 ; :::::

	4 =? / 2 = 4 / 2		// 2 = = // 2 4 4=	
D	2 . / - 2 3 2 3 5 = 1 3 = = / 3 5 - 3 3 2 / / / 0 / / / 4 / 5	2 D/	2 . / - 2 3 2 3 5 = 1 3 = = / 3 5 - 3 3 / / / / 0 / / 4 = / 5	
	/ . . 2 3 =? / 8 2 4 D / D5	=? 8	/ / / D 2 // 2 / 42= 4 3 8	24 /
?	0 / / 2 / / 3 / / D 4 / 5 / / 3 9 5 9 2= / 5	2 //	/ 2 . / / - / / / 2 F 2 4 D / D / 2 8 5 2 / / 2 3 ( . 3 / , 2 . 3 / 3 5	2 //
	0 / 2. / 3 / 4 2= 5 D / / 2 3 / / 7D	42 /	. - . 3 2 F4 / 5 / 5 2 . , J2 2 3 9	D

?				
	4		=	
4	/ / 4= 3		1 /	



( ) \* ) ,

0	1	0	1	2
/	/	/	/	/
/	/	/	/	/
/	/	/	/	/

/ 34	54? 67	8 9 /.	8
724 8 /. 46 5 / 1	424	4 4 4 4 8 5 . / r 2 / = =2 3 8 /. 5	62
=	NC/	NC/	NC/
4 = 8 / . 2 / 5 / / 5	2 /	4 8 / . / 5 / / 5	2 /
1 / / / = 3 4 C 3 ( = / = * (v = , . / . 4=6 5 / 5	4? 8	4 / * 1 / / / 4 4C / = 2N 5 3 ? 2 2 . 9 3 / . . 3 F . 5	C 8
? 1 / / / 2 3 4 . 3 ( =, 58 / . 3 4 N 2 8 5 0 0 / 3 / 5 / / 2=? / 5	24=	1 / / / 2 3 4 . 3 ( =, 58 / . 3 4 N 2 8 5 0 0 / 3 / 5 / 3 / / 2=? / 5	24=
C 0 / 5 / 3 O9 / 5	= 4 3= /	0 / 5 / 3 O9 / 5	= 4 3= /
6	0 1 3	0 v 1 3	



( ) \* ) ,

<p>0 1 . 0 .</p> <p>/ / - / 0 1 2. -</p> <p>/ . ) )</p>			
/ 34	54 67	8 9 / .	8

	<p>0 / . 3</p> <p>( =,2 . 3</p> <p>0 0 2 Q</p> <p>/ / 3</p> <p>2=? / 5</p>	<p>2 4 = 4</p>	<p>/ s 4 3</p> <p>2 . 0 0 3</p> <p>2 Q</p>	<p>2 4 = 4</p>
7	<p>3</p> <p>2</p> <p>1 2/ 3</p> <p>/ 1 Q</p> <p>s 4 3*5 3</p> <p>1 / 3</p> <p>/ 2/ /</p> <p>2 = / 5</p>	<p>2 4</p>	<p>1 / 3</p> <p>1 / . 15</p>	<p>=2 ?</p>
8	<p>13</p> <p>/ . / 3</p> <p>1 1 42 / 5</p> <p>* *9 5 / 3</p>	<p>?</p> <p>4</p>	<p>/</p> <p>2 / 2 3</p> <p>42 5</p> <p>/ * *9 3</p> <p>5</p>	<p>*</p> <p>* 6</p>
4	<p>/ s</p> <p>4 4 U = U</p> <p>58 1 1 3</p> <p>(. . /</p> <p>/ . /</p> <p>,Q</p>	<p>.</p> <p>/ /</p>	<p>/ s 4 =</p> <p>? U . - Q</p>	<p>? ?</p>

..	4		=	
4	<p>8 2</p> <p>9 1 /</p> <p>/ . 2</p> <p>. 3</p> <p>5 2</p> <p>/ / / 3</p> <p>- / /</p> <p>/ o / 5</p>	<p>4 6</p>	<p>1 3</p> <p>. / 2</p> <p>3</p> <p>42 / 5</p> <p>/</p> <p>/ 2 / / 3</p> <p>. / . 4*</p> <p>=6 U 4 42 / 5</p> <p>/</p> <p>/ . =* 4 6 U 5 3</p> <p>/ 3</p> <p>2 / Q</p>	<p>72 8</p>
=	<p>1 /</p> <p>s 4* 62 s =* 44 3</p>	<p>42 /</p>	<p>/ /</p> <p>1 0 0 1 3</p>	<p>=</p>



& & ' ( ) * ) ', &- &/ / 0 1 . 0 . / - / - / 0 1 2. - / . ' ) ) '			
/ 34	546 67	8 &9 /.	8

. / . 3 = * 42 / 5 & . 9 & / 2 3 / 5		. & 3 2. 3 . / / 3 1 5 / . / . * / 1 & 0 3 2 / & 58 3 & / . 9 1 / 2	
/ / / 76 / 2 3 ( / 5 . / . & 3 , 4 5 3 / / / 4 /		/ / / 76 / 2 ( / 5. / 3 & , 4 5 3 / / / 4	
& & 1 0 & 2 / & 1 2 1 . 2 3 / / & 2 / . / / 58 3 1 . 3 4 / =* 2 / 5 / . & ?2 5 1 * 42 / 5 / . / 2 ?2 /	2	& & 1 0 & 2 / & 1 2 1 . 2 3 / / & 2 / . / / 58 3 1 . 3 4 / =* 2 / 5 / . & ?2 5 1 * 42 / 5 / . / 2 ?2 /	2
? / 1 3 / . & . / . 2 . 3 & ? 3 . 5	=7 4 ?8	/ / 1 / / 42 5 & . 9 & / . 5	2 5 5 5
/ 1 & / / 42 5 & / . 2. & 2 . / / / 3 2 3	4=?24	/ 1 / . / . & 2 & ? . 3 3 3	7 4 ?8



<p style="text-align: center;">( ) ,</p>			
<p style="text-align: center;">0 1 0 . % - 0 1 2. -</p>			
% 34	547 67	8 9% .	8 ;

	4 (. 3		% 5	
6	<p>)</p> <p>1 % 2 1 3</p> <p>2 2 1</p> <p>5 9 . 3</p> <p>%</p> <p>. 5</p>	3=	<p>1 % 2 1 3</p> <p>=2 5</p> <p>% 3</p> <p>. 3</p> <p>5 % . 2</p> <p>. 0 5</p>	=2 %
7	<p>1 % 2 1 3</p> <p>=2 5</p> <p>% 3</p> <p>. 3</p> <p>5 % . 2</p> <p>. 0 5</p>	=2 %	<p>)</p> <p>1 % 2 1 3</p> <p>5 9 . 3</p> <p>% 5</p>	3=
	<p>% 2 1 3</p> <p>= 2 %</p> <p>% 4 2 5</p>	2 %	<p>% 2 1 3</p> <p>= 2 %</p> <p>% 4 2 5</p> <p>2% 5</p>	42 %
4	<p>% 2 (. , 3</p> <p>% 5 3 3</p> <p>1 1 % 5</p> <p>2 1 3</p> <p>5</p>	42	<p>% 2 (. , 3</p> <p>% 5 3 3</p> <p>1 1 % 5</p> <p>2 1 3</p> <p>5</p>	42

6			
4		=	







( ) + ) ,

$\frac{0}{1} \cdot \frac{0}{1} = \frac{0}{1} \cdot \frac{0}{1}$			
$+ \quad / \quad 34$	$5=4 \quad 67$	$8 \quad 9 \quad / .$	$8 ;$

$2. / \quad 9 .$			
$m / \quad / . \quad 13$			
$. \quad = / \quad / =5$			

7				
...	+ 4		+ =	
4	$a = \frac{2}{15} \cdot \frac{3}{1} \cdot \frac{1}{3}$ $9 \cdot \frac{1}{3}$ $= C \cdot 8 \cdot \frac{1}{3}$ $/ \cdot \frac{1}{9}$	4=	$\frac{9}{1} \cdot \frac{1}{2}$ $1. \quad 5$ $2 \quad 2 \quad 2 \quad / . \quad 3$ $5$	$\frac{762}{44C6} /$ $\frac{46?}{?} /$
=	$\frac{9}{1} \cdot \frac{1}{2}$ $1. \quad 5$ $2 \quad 3$ $/ . \quad 3$	6 /	$\frac{4}{4} \cdot \frac{2}{5} /$ $/ \quad /$	427 / /
	$\frac{1}{4} /$ $0 \quad = \frac{2}{2} / 2$ $/ \quad /$	=	$/ \quad / \quad . \quad 3$ $5+ \quad / \quad 3$	=2=
	$\frac{4}{24} / 5$ $/ \quad /$ $/ \quad 3$	? ? /	$+ \quad - \quad / \quad 9 \quad 3$ $/ \quad . \quad 4 = U$ $/ 5 \quad / . \quad 4 \quad ? \mathcal{Z}$ $= \quad / . \quad 2 \quad . \quad 3$ $/ \quad 4 = + . \quad 3$ $2 \quad / . \quad 3$ $9 - 0 \quad .$ $- \quad / \quad \mathcal{Z}14 \mathcal{Z} \quad 345$	4 =6
?	/ /		. 3	



$\frac{1}{2} + \frac{1}{3} = \frac{5}{6}$			
$\frac{1}{2} - \frac{1}{3} = \frac{1}{6}$			
$\frac{1}{2} \times \frac{1}{3} = \frac{1}{6}$			
$\frac{1}{2} \div \frac{1}{3} = \frac{3}{2}$			
+	%	34	8

	$\frac{1}{2} + \frac{1}{3} = \frac{5}{6}$	6 U	$\frac{1}{2} \times \frac{1}{3} = \frac{1}{6}$	462
C	$\frac{1}{2} - \frac{1}{3} = \frac{1}{6}$	?2 +	$\frac{1}{2} \div \frac{1}{3} = \frac{3}{2}$	62
6	$\frac{1}{2} + \frac{1}{3} = \frac{5}{6}$	=?	$\frac{1}{2} - \frac{1}{3} = \frac{1}{6}$	7
7	$\frac{1}{2} \times \frac{1}{3} = \frac{1}{6}$	=6 +	$\frac{1}{2} \div \frac{1}{3} = \frac{3}{2}$	? ?
	$\frac{1}{2} + \frac{1}{3} = \frac{5}{6}$	2	$\frac{1}{2} - \frac{1}{3} = \frac{1}{6}$	=
4	$\frac{1}{2} \times \frac{1}{3} = \frac{1}{6}$	4 =6	$\frac{1}{2} \div \frac{1}{3} = \frac{3}{2}$	4=





( ) ) ,

<p style="text-align: center;">- . - / /</p>			
<p style="text-align: center;">0 1 . 0 . / - / - / 0 1 2 . - / . ) )</p>			
/ 34	5= 67	8 9 / .	8

	= 5		DD / 5 2 / 5	
C	<p style="text-align: center;">/ 3</p> <p style="text-align: center;">0 3</p> <p style="text-align: center;">2/ 5</p> <p style="text-align: center;">44 / 5 . 3</p> <p style="text-align: center;">/ . 4</p> <p style="text-align: center;">/ . 5</p>	=? 6 /	<p style="text-align: center;">/ 3</p> <p style="text-align: center;">. 2 /</p> <p style="text-align: center;">/ . /</p> <p style="text-align: center;">. 2 . / 2</p> <p style="text-align: center;">. . 3</p> <p style="text-align: center;">9 3</p> <p style="text-align: center;">? /</p> <p style="text-align: center;">58 .</p> <p style="text-align: center;">= 5 . 3</p> <p style="text-align: center;">. /</p> <p style="text-align: center;">C 5</p>	D42D
6	<p style="text-align: center;">H 1 . 3</p> <p style="text-align: center;">1 / . 3</p> <p style="text-align: center;">1 . 1 2</p> <p style="text-align: center;">0 9 1 3</p> <p style="text-align: center;">. 5 3</p> <p style="text-align: center;">= / 2 1 4 = ?</p> <p style="text-align: center;">5 .</p> <p style="text-align: center;">/ . 10 5</p>	466 /	<p style="text-align: center;">/ 3</p> <p style="text-align: center;">. D /</p> <p style="text-align: center;">. 5</p> <p style="text-align: center;">/ 2</p> <p style="text-align: center;">= 5</p>	4=6 /
7	<p style="text-align: center;">. 4/</p> <p style="text-align: center;">/ 58</p> <p style="text-align: center;">/ 4 5</p> <p style="text-align: center;">. / 3</p> <p style="text-align: center;">. 0</p>	DC /	<p style="text-align: center;">B = 2. . 3</p> <p style="text-align: center;">/ . 3</p> <p style="text-align: center;">/ 4 // = 2 0 3</p> <p style="text-align: center;">0 .</p> <p style="text-align: center;">/ . 467 / 5</p> <p style="text-align: center;">. 0</p> <p style="text-align: center;">. 0 / . 3</p> <p style="text-align: center;">2 0</p>	24=
N	<p style="text-align: center;">0 . 3</p> <p style="text-align: center;">/ 3</p> <p style="text-align: center;">. . 0</p> <p style="text-align: center;">. 4 0 1 5</p> <p style="text-align: center;">. 3</p> <p style="text-align: center;">0 = 2 . 3</p> <p style="text-align: center;">/ . 0</p> <p style="text-align: center;">. 3</p> <p style="text-align: center;">2 . 3</p>	4	<p style="text-align: center;">B = . /</p> <p style="text-align: center;">. 2 / . 3</p> <p style="text-align: center;">. / / / 5 . 3</p> <p style="text-align: center;">/ .</p> <p style="text-align: center;">9 3</p> <p style="text-align: center;">/ 4</p>	662= /
4	<p style="text-align: center;">B . 3</p> <p style="text-align: center;">/ .</p> <p style="text-align: center;">4 /</p> <p style="text-align: center;">= / / / ? / 5</p> <p style="text-align: center;">/ . 3</p> <p style="text-align: center;">2 1 / 9 3</p>	= 6	<p style="text-align: center;">8 / 1 /</p> <p style="text-align: center;">. 7 5 / 3</p> <p style="text-align: center;">. 2 . 3</p> <p style="text-align: center;">/ / . 3</p>	27 /



( ) + ) ,

$\frac{0}{1} \cdot \frac{0}{1} = \frac{0}{1}$			
$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$			
+	/	34	8

$\frac{2}{3} \cdot \frac{3}{4} = \frac{2}{4}$	$\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} = \frac{1}{3}$
---	---

4			
..	+ 4		+ =
4	$\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} = \frac{1}{3}$	$2 \cdot 1 = 2$	$\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} = \frac{1}{3}$
=	$\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} = \frac{1}{3}$	4	$\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} = \frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} = \frac{1}{3}$	4	$\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} = \frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} = \frac{1}{3}$	$2 \cdot 1 = 2$	$\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} = \frac{1}{3}$
?	$\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} = \frac{1}{3}$	$2 \cdot 1 = 2$	$\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} = \frac{1}{3}$
8	$\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} = \frac{1}{3}$	$2 \cdot 1 = 2$	$\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} = \frac{1}{3}$



( ) \* ) ,

0 1 . 0 .			
/ / - / 0 1 2 . -			
/ . ) )			
/ 34	5=C 67	8 9 / .	8

6	2 / 3 / 13 C4 / L2 1 3 5 3	4? / L	1 / / 2 3 2 . 3 42 4t4 ?*8 . 3 42= L 5	4 / L
7	777 . / 3 = / ) 5 3 ? *	=?4= /	2 3 = / ) 2 / / 3 / 4 C . = ? .	6 / 4 C /
	2 . / 3 = / 4 ) 0	4=XC / ) 0	2 . / 4 = / . * 4 ) 0	4=XC / ) 0
4	/ / / 3 / / . 0 1 / / ? - 4 5 / 24 / 5 2 2 3 / / / 0 . 3 * 2 9 3 / 5	2= / 4 24 / ) 0 34?6 4 C /	/ / / 3 / . 0 1 3 / / ? - 4 5 / 3 24 / 5 2 3 2 / 3 / / 0 . 3 * 2 5	2= / 4 24 / ) 0 34?6 4 C /

44				
. L	4	=		
4	8 - 0 - . 3 0 2 ( ?7 / , . 12. 3 1 0 2 / 2 7 / 5 3 5	= 4 / L	8 - - . 3 / / 2 ( ?2 / , / - / 0 . 246 / 5 3 /	4 4 / L
=	0 . 3 / 3 1 / / / 2. 3 / . / . 3 1 . 5 3 /	2 4 x /	. / 1 3 / / / 2. / . / . 1 . 3 5 n 7XC / 5	?7 4 3 /



' ( ) \*+ ) ' ,

0 1 . 0 .			
/ / - / + ) ' 1 2. -			
+ / 34	5=6 67	8 9 /.	8

	5 1 1 / 1 0 2 // a4 27 // 5 2 / 5 3 5		/ 5 / 3 2 3 0 ( 3 / 0 , 2 // 5 3 5	
D	*. 1. 3 2 3 1 4/2 . 3 1 3 4/5 ? /	2 // 64 // 7 // 42 // 424= //	*. 1. 3 2 3 . 1 3 4/5 ? / 5	64 // 42 // 42= // 42 4 // 427 //
	- 0 3 ** / 3 1 / ( 3 / ,5 2 * . / 3 / 4 / 5 3 * 2 3 0 5	4 6 /	- 0 3 * / / 1 3 8 / ( ? / ,5 / 9 / / 3 - / / 3 / 58 / 3 0 - 0 1 3 02 / 1 9 2 / /	4 3D /
?	- 0 3 / . . 3 58 . 3 / . 4 / . . 9 / 5 / . =2 . 1 3 / . ( 6 / ,	/	- 0 3 / . . 2 . 3 / 5 =* . ( 4 6 / , . 3 .	= 6 /
	/ 0 / 3 5 / . 1 3 0 ? 7 5	DN 4 = +	9 3 / s' / 0 9 3 1 / 0 / . 25	2 + / =
6	3 / . 3 1 26 + 5 / 3 . . 1 =? . k 4 / = 5 3	D	3 / . 1 3 26 + 5 / . . 1 =? k 4 / = 5 / 3	D



( ) \* ) ,

0 1 . 0 .			
/ / - / 0 1 2 .			
/ . ) )			
/ 34	5=7 67	8 9 / .	8

	/ / 9 . 1 2 9 . 1 / 3 / . 5		v / 9 . 1 2 3 9 . 1 3 / 9 . 1 3 / . 5 . 3	
7	/ . / . 5 9 / 9 3 3 / 9	74	/ . / . 4 5 / / 9 . 3 /	=
N	/ . 4 =N 5 3 3 2 . 1 3 / / / . 3 . 9 3 / 2 / r N/ / 5 / . 3 = 1	=N	/ . 4 =N 5 3 3 2 . 1 / / / . 3 9 / 3 2 / r N/ / 5 / . = 1 3	=N
4	8 1 / . 4 5 / . 9 . 13 r 4 2 1 r 4 5 3 / 9 3 / 9 . 1 9	42	/ v . 3 / / 3 / / = / 2 . / . 3 r =6 / . 3 / . 3 =N 5 2 . 3 3	

4=				
..	4		=	
4	9 2 3 9 3 9 - ?=4 /	N= 4 ? /	9 2 / . / . - ?= /	42 4 /
=	2 3 0 - 9 - 2 / =6? / 5 / 3 / 9 - 2	62= 4 3N	2 3 0 - 9 - 2 / =6? / 5 3 1 9 / 3	6 4 3N



( ) \* ) ,

<p style="text-align: center;">- . . / /</p>			
<p style="text-align: center;">0 1 . 0 . / - / 0 1 2. -</p>			
<p style="text-align: center;">/ . ) )</p>			
/ 34	5=N 67	8 9 / .	8

- 9 - 5		2/ / 9 2 / 1 / / P47 / 2 / / 3 9 *9 3 5	
P6 27 . / . 3 / . - 5 1 2 hP = 1 .	6 2= 4 34= /	P6 27 . / . / . . 3 - 5 1 2 3 1 . hP 5	6?2 4 34= /
4=3 . / 3 1 3 5 9 - 3 0 . / 9 / P?2 / = 5	2 //	4=3 . / 3 1 5 3 9 - 0 . / 9 3 / P?2 / = 5	2 //
?	42 4 4 4 34 34	/ / 3 9 . 0 gP=27 4 34 5 v v . 0 / / 9 1 . / 3 /	42 4 4 4 34 34


4			
4	4	=	=
/ 2 3 P 2t4 4 5	2 N 4 3N	/ . s=4 7 _2 P 2t4 4 5	2= /
=	P4 / . s=4 7 _5	42 6 4 7 / . s=4 7 _5 P4	42 6 4 7
s= N . 1 3 1 3 .	=4 7 _	s= 7 N= . 1 3 . 1 3 .	= 76
/ . . / 2 3 P4 2t 4 N 5 / . . / . 3 P=2=t4 N	4 2 ?	/ . . / 2 3 P4 2t 4 N 5 / . 3 . . / . 3 P=2=t4 N	4 2 ?



( ) \*+ ) ,

<p>0 1 . 0 . / / - / - / 0 1 2. - / . ) + )</p>			
+ / 34	5 67	8 9 / .	8

?	<p>02 3 2 3 / . / . 3 2. 9 / 3 / / / 0 / . 5 2 2 / P4 s=7= 9 . 1 / P = 0 s=7= 5</p>	4 <sup>N</sup>	<p>02 3 2 / 3 . / . 2. 9 / / / 0 / . 5 3 2 2 / P4 s=7= 2 9 . 1 / P = 0 s=7= 5</p>	4 <sup>N</sup>
	<p>9 . s=6 5</p>	N 9+	H 9 / s= 5	=72 9+
6	<p>9 2 3 . 0 =4 a s=4 s=4 a s=4</p>	24 9+	<p>9 2 3 . 0 =4 a s=4 s=4 a 5</p>	24 9+
7	<p>/ 3 2 s= 3 . s= 58 3 0 s= 3 0 3 / 5 / 2 3 2 2 9 / P? . 3 0 / =P42-t4 s=345+ 1 0 4P4L 2 5 5 s= 3 0 P 0 5</p>	=24 4 <sup>3N</sup>	<p>/ 3 2 . ==5=75 s= 0 / 3 s= 3 0 2 / 3 / 3 4P 2t4 4 s= 2. . 3 Q+ 1 0 4P4L 5</p>	N=? 4 34
N	<p>+ 0 s=4 6 ( 2, 3 9 s= 3 0 4P62 9+58 / / . 3 s= 3 0 . 2 2 9 =P72 9+Q</p>	=	8 / . 3 s= / s= 3 0 2 // . / . / 3 1 5 3 9 s= / s= 3 0 2 2 9 / 3 1 4P 2= 9+Q 5	762
4	<p>/ s=? N= 3 1 / P4 / 9 0</p>	4	<p>/ s=? N= 1 3 / P4 / 3 9 0 / 3</p>	4

			
%	( )	)	,
%	-	%	%
0	1	0	%
%	-	%	0
1	2	-	%
3	5	7	8

P?	%	Q	.
2	%	5	3
P=	5	%	%
P?	%	Q	.
%	%	5	2
P=	5	%	3

5

## 1 0

### СХЕМА УСТАНОВКИ

Установка (рис. 16) представляет собой вертикальный цилиндр, в котором под поршнем находится идеальный газ при температуре  $273\text{ K}$ . Пространство над поршнем соединено с атмосферой. Вы сообщаете газу  $Q > 0$  (или отнимаете  $Q < 0$ ) некоторое количество теплоты. Процессы нагрева и охлаждения отражаются на графиках  $p(V)$  и  $V(T)$ . В компьютерной модели, как и в реальном процессе в газе, изменение температуры от начального до конечного значения происходит нелинейно — скорость теплопередачи при уменьшении разности  $(T_{\text{стенки}} - T)$  уменьшается.

#### Измерения

Для исследования вам предлагаются основные газовые процессы.



( ) ) ,

1			1 2.
3	7	8	8

1. *Изобарный процесс.* Изобарный процесс осуществляется при давлении

$$p = p_0 + \frac{mg}{S},$$

где  $p_0$  — атмосферное давление,

$m$  — масса поршня,

$g$  — ускорение свободного падения,

$S$  — площадь поршня.

Для нахождения конечной температуры можно использовать:

- изменение объёма газа, произошедшее при нагревании, используя закон Гей-Люссака;
- первое начало термодинамики, проведя необходимые измерения.

Сравните найденные температуры.

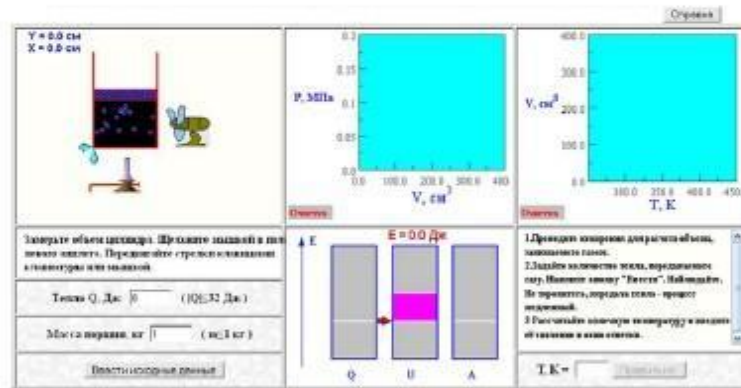


Рис. 16. Схема установки

2. *Изохорный процесс.* В этом упражнении газ подогревают или охлаждают при постоянном объёме. После проведения опыта нужно убедиться, что значение внутренней энергии газа не изменилось, а совершенная работа равна нулю. После выполнения эксперимента компьютер предложит сравнить затраты тепла на переход от одной



1			
3	7	8	8

температуры к другой в изобарном и изохорном процессах и указать причину различия.

- Изотермический процесс.* В этом процессе системе передаётся теплота, поршень движется вверх, а давление газа уменьшается. Изменение параметров газа отражается на графиках  $p(V)$  и  $V(T)$ . На диаграммах  $Q$ ,  $U$ ,  $A$  видно, что внутренняя энергия постоянна, тепло идёт на совершение газом работы по поднятию поршня. Далее компьютер вновь выводит на экран значения начальных и конечных температур,  $Q$ ,  $dU$  и  $A$  для опытов с первого по третий и предлагает указать, чем вызвано различие в величинах совершённой работы в первом и третьем опытах.
- Адиабатный процесс.* Завершается работа программы опытом, в котором моделируется адиабатный процесс. Газ теплоизолирован, поршень удерживается в начальном положении задвижкой. После освобождения поршня газ расширяется. Процесс заканчивается, когда давление газа сравняется с внешним давлением. Из диаграмм можно убедиться, что работа совершается за счёт убыли внутренней энергии.

В ходе выполнения работы руководствуйтесь заданиями и подсказками на экране. Можно также обращаться к справке, содержащей теоретические сведения по теме.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

В отчёте ответьте письменно на 3 — 4 вопроса по выбору преподавателя.

- Дайте определение изохорного, изобарного, адиабатного и изотермического процессов.
- Поясните, почему в первом опыте мы имеем дело с изобарным процессом.
- Проведите два процесса с одинаковым количеством теплоты, передаваемым газу: изобарный и изохорный. Объясните причину различия изменения температуры в этих процессах.



( ) ) ,			
1 . . . . . 1 . . . . .			
34	7	8 . . . . .	8

4. Пусть начальная температура газа в установке равна 273 К. Газу сообщают некоторое количество теплоты при постоянном давлении. Какие измерения в отсутствии термометра позволяют рассчитать конечную температуру газа?
5. Распирение газа в изобарном процессе для поршня из алюминия и свинца практически одинаково. Как это объяснить? Вывод подтвердите расчётом.
6. Проведите измерение объёма до и после нагревания в изобарном процессе. Рассчитайте совершённую работу, сравните её со значением на диаграмме.
7. Убедитесь, что в изотермическом процессе газ совершает большую работу, чем в изобарном при сообщении газу одного и того же количества тепла. Объясните это различие.
8. Объясните, почему изотермическое расширение газа возможно только при подведении к нему некоторого количества тепла.
9. Каков источник энергии для совершения работы в адиабатическом процессе?
10. Объясните, почему при холостых выстрелах ствол пушки нагревается сильнее, чем при стрельбе снарядами.

## 1

### СХЕМА УСТАНОВКИ

Тепловой двигатель (рис. 22) состоит из рабочего цилиндра, заполненного газом, нагревателя и холодильника. С двигателем соединен электронный термометр. Состояние газа во время работы двигателя отражается на графиках  $p(T)$  и  $V(T)$  и диаграммах передаваемого ему ( $Q > 0$ ), отдаваемого им ( $Q < 0$ ) количества теплоты, внутренней энергии  $U$  и совершаемой газом работы  $A$ .



( ) ) ,

1

1

3

5 7

8

8

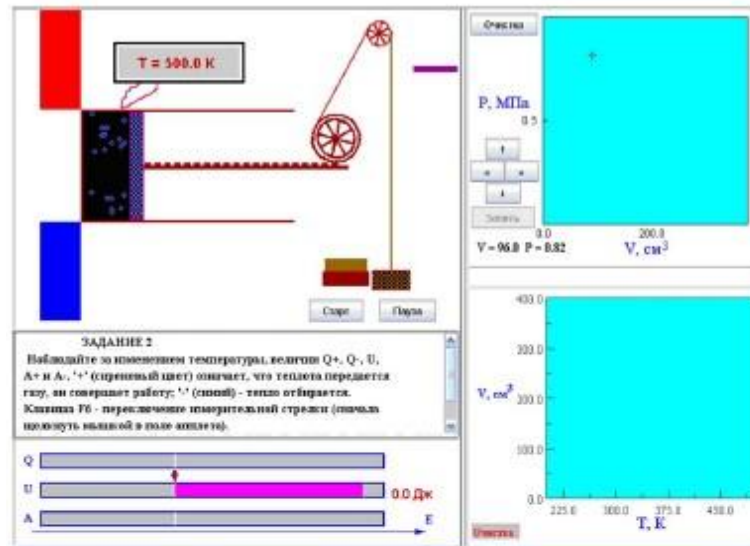


Рис. 22. Схема установки

#### Измерения

1. Определите количество молей газа в камере теплового двигателя.
2. Запустите двигатель нажатием 'Старт'. Он будет работать по циклу Карно. Определите КПД двигателя разными способами.
3. По полученным данным вычислите приведённое количество тепла для процессов изотермического расширения и сжатия, а также изменение энтропии при выполнении цикла Карно.
4. Исследуйте работу двигателя по другим циклам, которые зададите сами движением крестика на графике  $p(V)$ . Нарисуйте замкнутую кривую (желательно простой формы), нажмите 'Старт', двигатель придет в движение. Определите его КПД и сравните это значение с найденным для цикла Карно.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ



1			
3	67	8	8

**В отчёте ответьте письменно на 5 вопросов по выбору преподавателя.**

1. Какой газ называется идеальным? Напишите его уравнение состояния.
2. Дайте определение внутренней энергии макросистемы. Как определяется внутренняя энергия идеального газа?
3. Сформулируйте первое начало термодинамики.
4. Сформулируйте второе начало термодинамики.
5. Какой вид имеет первое начало термодинамики для изотермического и адиабатического процессов?
6. Какие устройства называют тепловыми двигателями? Из каких основных элементов состоит тепловой двигатель?
7. Зачем в тепловом двигателе нужен холодильник? Что является холодильником в двигателе внутреннего сгорания?
8. Чем отличаются обратимые и необратимые процессы? Почему все реальные процессы необратимы?
9. Дайте определение понятия энтропии. Какова её размерность?
10. В каком направлении может изменяться энтропия замкнутой системы? незамкнутой системы?
11. Дайте вероятностное определение энтропии.
12. Сформулируйте первую и вторую теоремы Карно.
13. Каковы пути повышения к.п.д. тепловых двигателей?
14. Изобразите в системе координат  $T-S$  изотермический и адиабатический процессы и цикл Карно в целом.
15. Как графически определяется работа при изобарическом расширении?
16. Изобразите цикл, состоящий из изобары, изохоры и изотермы. Какую работу, положительную или отрицательную, совершает газ за один цикл? На каких элементах цикла теплота поглощается газом, на каких выделяется? Какое количество теплоты больше: переданное или отданное газом?
17. Изобразите цикл, состоящий из двух изобар и двух изохор. На каких участках газ находится в контакте с нагревателем, на каких — с холодильником?
18. Попытайтесь изобразить цикл, к.п.д. которого был бы близок к таковому для цикла Карно.
19. Можно ли из изобары, изохоры и изотермы составить цикл, в котором отданная газом теплота превышала бы теплоту, переданную газу?
20. Сравните работу, количество передаваемого тепла газу при совершении одного и того же цикла, но в противоположных направлениях.
21. При быстром сжатии газа в цилиндре его температура повышается. Изменяется ли его внутренняя энергия? Запишите 1-й закон термодинамики для этого случая. Где нашло применение это явление в технике?
22. Почему при выпуске газа из баллона вентиль покрывается росой или инеем? Объясните наблюдаемое явление с помощью 1-го закона термодинамики.



( ) ) ,

1

1

3

7

8

8

# 1

## СХЕМА УСТАНОВКИ

Установка (рис. 69) представляет собой замкнутый сосуд, оборудованный датчиками давления и температуры. Вы можете управлять движением поршня кнопками со стрелками  $\leftarrow$ ,  $\rightarrow$ , и изменять объем,

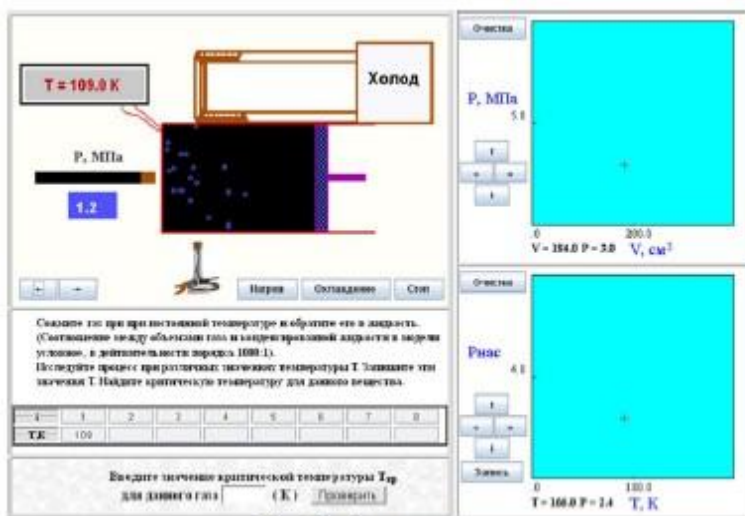


Рис. 69. Схема установки



( ) ,			
1			
1			
3	7 7	8	8

занимаемый газом. Температура газа при процессе сжатия поддерживается постоянной. Газ предварительно можно подогреть (кнопка "Нагрев") или охладить (кнопка "Охлаждение"). Для прекращения подогрева или охлаждения служит кнопка "Стоп". Изменения состояния газа отражаются на графиках  $P(V)$  и  $V(T)$ .

#### Измерения

1. Сожмите газ и обратите его в жидкость при выбранной температуре. Исследуйте процесс конденсации газа при различных температурах. Получите семейство кривых  $p(V)$  для различных температур.
2. Найдите в результате исследования критическую температуру для данного вещества. На изотерме реального газа  $p(V)$  при критической температуре  $T_{кр}$  исчезает горизонтальный участок, соответствующий конденсации пара. По этому признаку можно определить значение критической температуры для исследуемого газа.
3. По полученным данным постройте график зависимости давления насыщенного пара  $P_{нас}$  от температуры  $T$ . Для этого используйте подвижный крестик, положением которого можно управлять расположенными рядом клавишами. Чтобы зафиксировать положение крестика на графике, нажмите клавишу «Запись».
4. Найдите поправки Ван-дер-Ваальса  $a$  и  $b$  для газа, используемого в данной компьютерной модели.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

В своём отчёте дайте письменный ответ на 4 — 5 вопросов по выбору преподавателя

1. Уменьшая объём, получите изотерму для реального газа. Какому состоянию вещества соответствует каждый отрезок изотермы?
2. Получите на графике  $P(V)$  три изотермы для вещества при температуре ниже критической, критической и выше критической.



( ) ) ,

1

1

3

7

8

9

8

Укажите на графике точку, соответствующую критическим объему и давлению.

3. Получите семейство изотерм реального газа. Измерьте давление насыщенных паров для каждой из них, постройте график зависимости давления насыщенных паров от температуры. Почему эта зависимость в отличие от закона Шарля для идеальных газов не является линейной?
4. В каком состоянии вещества при постоянном объеме плотность повышается с температурой и почему это происходит?
5. Перегретый пар, находящийся в цилиндре под поршнем, сначала нагревают при постоянном объеме, затем медленно сжимают при постоянной температуре до полного сжатия. Начертите график зависимости давления  $P$  от объема  $V$ .
6. Сформулируйте условия применимости понятия "идеальный газ".
7. Поясните, почему газ можно использовать и используют в амортизаторах?
8. Что можно сказать о плотности жидкости и насыщенного пара при критической температуре?
9. Почему лёд тает дольше, если его завернуть в мокрую газету?
10. Почему вода в водоёмах начинает замерзать с поверхности?
11. Воду можно охладить до температуры ниже  $0^\circ \text{C}$ . При этом, если переохлаждённую воду встряхнуть, она кристаллизуется и нагревается до  $0^\circ \text{C}$ . Чем это объяснить?
12. Почему в городе туман бывает чаще, чем за городом?
13. Какое значение имеет для организма человека потовыделение?
14. Из-за большой теплоёмкости вода прогревается медленнее воздуха, поэтому даже в жаркий летний день вода в пруду холоднее воздуха. Почему же тогда после купания вода кажется теплее воздуха?
15. Почему сильная жара труднее переносится во влажном климате, чем в сухом?



0	1	0	0	1
4	7	8	8	

16. Почему в сухом воздухе (например, в сауне) человек выдерживает температуру, превышающую  $100^{\circ}\text{C}$ ?
17. Почему в комнате после мытья пола чувствуется прохлада?
18. Почему нам становится холодно, когда наша одежда намокает?
19. Как известно, вода имеет гораздо большую теплоту парообразования, чем спирт. Следовательно, налитая на руку вода, испаряясь, должна сильнее охладить руку, чем налитый на руку спирт. В действительности всё происходит наоборот. Почему?
20. На улице целый день моросит холодный осенний дождь. В кухне развесили много выстиранного белья. Быстрее ли высохнет бельё, если открыть форточку?
21. В две одинаковые кастрюли налито равное количество воды при одной и той же температуре, но в одну из них — сырая вода, в другую — кипячёная. Если поставить обе кастрюли на огонь одинаковой силы, то в какой из них вода закипит быстрее?
22. Почему сырые спички не загораются?
23. Почему вода гасит огонь?
24. Почему при нагревании воды пузырьки пара образуются вначале у дна сосуда?
25. Почему чайник шумит перед закипанием воды в нём?
26. Почему вода, налитая на раскалённую плиту, шипит?
27. Отличается ли температура кипящей воды в чайнике от температуры пара в нём?
28. Одинакова ли средняя кинетическая энергия молекул водяного пара, воды и льда, если температура их одна и та же?
29. При критической температуре удельная теплота парообразования для всех жидкостей равна нулю. Почему?



( ) ) ,

1

1

4

4 7

8

8

Установка представляет собой замкнутый объем, оборудованный датчиками давления и температуры. Вы можете управлять движением поршня кнопками со стрелками  $\leftarrow, \rightarrow$  и изменять объем, занимаемый газом. Газ можно подогреть (кнопка "Нагрев") или охладить (кнопка "Охлаждение"). Для прекращения подогрева или охлаждения служит кнопка "Стоп". Изменение состояния газа отражаются на графиках  $p(V)$  и  $V(T)$ .

Схема установки приведена на рис. 4.

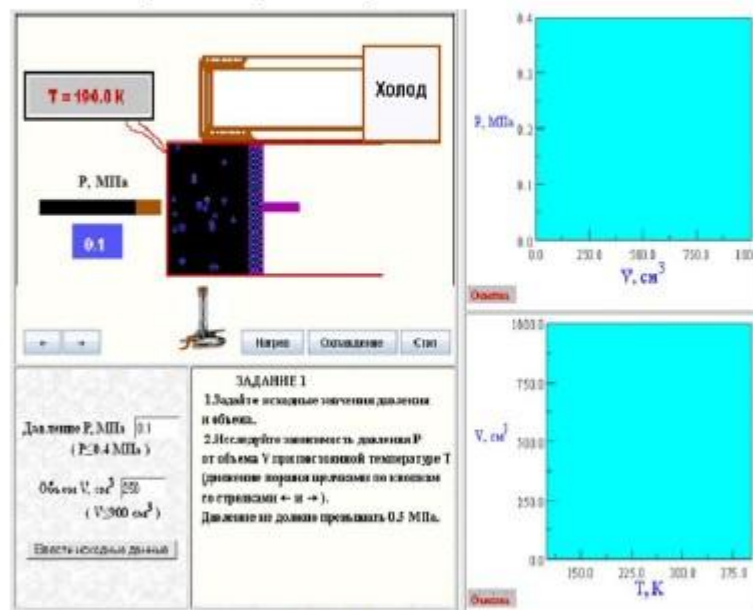


Рис. 4. Схема установки

Вам предлагается выполнить такие упражнения:

1. *Исследование изотермического процесса.* Вы можете уменьшить (увеличить) объем, занимаемый газом. Этот процесс найдет отражение и на модели и на графиках;



1			
		1 2.	
4	7	8	8

2. Во втором упражнении предлагается исследовать *изохорический* процесс и дать заключение о зависимости  $p = f(T)$ . Изменять следует температуру газа однократным нажатием клавиш ("Нагрев") или ("Охлаждение"). Клавиша "Стоп" останавливает нагрев или охлаждение. Датчик температуры показывает текущее значение  $T$ . На графиках отражается изменение параметров газа;
3. Чтобы *осуществить изобарный процесс* в этом упражнении, требуется некоторая сноровка, которая быстро приобретается в ходе опыта: следует включить подогрев (охлаждение) газа и время от времени нажимать нужную клавишу изменения объема;
3. *Эксперимент с циклом, состоящим из изохоры, изотермы и изобары.* Упражнение 4 служит для закрепления понятий изобара, изохора и изотерма. На графике  $V(T)$  изображен процесс, состоящий из изотермы, изохоры и изобары. Исходное состояние отмечено звездочкой. Вам предлагается осуществить процесс, регулируя температуру газа (клавиши "Нагрев" и "Охлаждение") и занимаемый им объем (клавиши  $\leftarrow, \rightarrow$ ).
4. *Исследование переходов системы между состояниями, задаваемыми экспериментатором на диаграмме  $p(V)$ .*  
В последнем опыте модель установки отслеживает изменение состояния газа, определяемого положением точки на графике  $p(V)$ . Вы будете иметь в своем распоряжении подвижный крестик на графике  $p(V)$ . Произвольные изменения его положения клавишами со стрелками приводят к необходимым движениям поршня, включению (выключению) нагревателя или охладителя. Тем самым связь между процессом изменения состояния газа и его графическим представлением устанавливается в наглядной форме.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ

1. Какой газ называется идеальным?



1			
34	7	8	8

2. Не включая подогреватель, измените объем, занимаемый газом, и наблюдайте за изменением давления  $p$ . Объясните ход кривых на графиках  $p(T)$ ,  $V(T)$ ,  $p(V)$ .
  3. Почему из обычной бутылки, перевернутой отверстием вниз, вода выплывает прерывистой струей ("булькает"), а из резиновой медицинской грелки — непрерывной струей?
  4. Установите поршень в среднее положение. Включив подогреватель (охладитель), наблюдайте за изменением давления. Объясните ход зависимостей на графиках  $p(T)$ ,  $V(T)$ ,  $p(V)$ .
  5. Две колбы с воздухом различного объема при нормальном давлении закупориваются и нагреваются в парах кипящей воды до  $100^\circ\text{C}$ . Одинаково ли будет в них давление воздуха после нагревания?
  6. Почему медицинская банка с нагретым воздухом "присасывается" к телу человека?
  7. Включив подогреватель (охладитель), регулируйте объем движением поршня таким образом, чтобы давление оставалось постоянным. Объясните связь величины объема и температуры.
  8. Используя уравнение Менделеева-Клапейрона, найдите массу газа в объеме при известном давлении.
  9. Проведите процесс, заданный замкнутой кривой на диаграмме  $V(T)$ , регулируя объем и температуру газа.
  10. Состояние газа изображается некоторой точкой на графике  $p(V)$ . Начертите график изменения состояния газа, если его сначала нагревают при постоянном давлении, а затем охлаждают при постоянном объеме.
  11. Вычертите на графике  $p(V)$  несколько замкнутых кривых, состоящих из изобары, изохоры и изотермы. Наблюдайте за необходимыми операциями по изменению объема и температуры для перехода газа из одного состояния в другое. Начертите произвольную кривую и наблюдайте за поведением системы.
- Ответы на контрольные вопросы в письменном виде приведите в отчете.



( ) ) ,

1

1

4

7

8

8

#### СХЕМА УСТАНОВКИ

Установка для изучения эффекта Зеемана (рис. 4) состоит из магнита (1), между полюсами которого находится источник света, вращающегося спектрометра (2), системы линз (3), поляроида (4), фотоприёмника (5) и окуляра спектрометра (6).

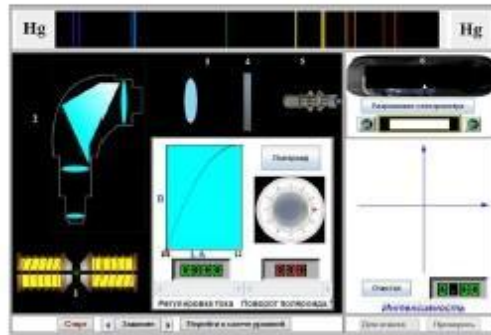


Рис. 4. Схема установки



1			
4	5	7	8

## ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения проводим последовательно сначала для простого эффекта Зеемана, а затем для сложного.

**Задание 1.** Зажгите спектральную лампу нажатием кнопки «Старт» (при этом с экрана компьютера исчезают цифровые обозначения частей установки). В появившемся спектре надо найти подходящую для изучения линию (желтые линии натрия 589 и 589.6 нм для исследования сложного эффекта или желтая ртуть 579.0 для простого). Несколько последовательных нажатий кнопки «Разрешение спектрометра» позволит увидеть на экране в увеличенном масштабе, что желтая линия натрия – дублет. Тут стоит посмотреть схему уровней и переходы между ними, которые дают этот дублет в отсутствие внешнего магнитного поля (для этого служит кнопка “Перейти к схеме уровней” вывода на экран этой схемы).

Затем надо выбрать одну из линий дублета. Для выбранной линии индикатор покажет длину волны.

Регулируя величину тока, протекающего через обмотку магнита, качественно исследуйте зависимость расщепления спектральной линии от величины магнитной индукции. Если расщепление линии в магнитном не видно, разрешение надо еще увеличить, нажав еще раз кнопку «Разрешение спектрометра» (Не переусердствуйте, а то вернетесь к начальному низкому разрешению). Найдите формулу, связывающую число подуровней, образующихся в магнитном поле, и квантовое число полного момента количества движения атома. Опишите наблюдаемые результаты эксперимента.

**Задание 2.** При максимальном разрешении измерьте величину расщепления для 6 — 10 значений индукции магнитного поля. Величина индукции и сила тока связаны соотношением:  $B=0.2 \cdot (I \cdot l / 24)$  Тл (ток в А). Полученные результаты оформите в таблицу. Постройте в отчете график полученной зависимости. По результатам измерений для простого эффекта методом наименьших квадратов определите удельный заряд электрона из проведенных измерений.

**Задание 3.** Для сложного эффекта при максимальных значениях индукции поля и разрешения установите соответствие между длиной линии и



1			
4	67	8	8

переходами между подуровнями  $P_{3/2}$  и  $P_{1/2}$  и  $S_{1/2}$ . Для этого на схеме уровней и переходов определите с помощью подвижного указателя энергию каждого из подуровней и рассчитайте длины волн излучения при переходах. Схему уровней с указанием найденных значений энергии постройте в отчете, пронумеруйте линии переходов в порядке возрастания длин волн (частоты). Сравните расчетные значения длин волн с измеренными ранее.

**Задание 4.** Для сложного эффекта по измеренным расщеплениям подуровней  $\Delta E$ , рассчитайте гиромагнитное отношение  $g$  для подуровней  $P_{3/2}$  и  $P_{1/2}$  и  $S_{1/2}$ . Введите Ваше значение для подуровня  $P_{3/2}$  и проверьте его. Сравните остальные с известными значениями.

**Задание 5.** Для простого и сложного эффектов при максимальных значениях индукции поля и разрешения исследуйте поляризацию отдельных компонент линии. (Установите поляризатор, нажав соответствующую кнопку, и вращайте его.) Опишите наблюдаемое явление с качественной стороны. Какие предположения можно высказать по поводу наблюдаемых явлений?

**Задание 6.** Постройте графики экспериментальной и теоретической зависимости интенсивности света от угла поворота поляризатора  $\phi$  для каждой компоненты (на миллиметровой бумаге в полярных координатах). Для этого измерьте интенсивности для углов поворота поляризатора от 0 до 360 градусов с шагом 10 градусов. Чем отличаются графики для различных компонент линий? Чем вызвано это отличие?

**Задание 7.** Определите индукцию магнитного поля в солнечных образованиях (в Гл) по наблюдаемому расщеплению линий  $\Delta\lambda$  в этом поле. Проверьте полученный вами ответ.

Сделайте выводы по результатам работы.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Приведите пример устройства, содержащего элементы, обладающие магнитным моментом (есть в любой квартире)?
2. Дайте определение эффекту Зеемана
3. Дайте определение магнитному моменту атома
4. Приведите формулу для дополнительной энергии атома в магнитном поле и объясните ее.
5. Дайте определение правилу отбора. Поясните, где это правило применяется.
6. Объясните, как поляризованы компоненты спектральной линии при ее расщеплении в магнитном поле.
7. Оцените значения расщепления спектральных линий при нормальном эффекте Зеемана



1			
4	7	8	8

#### *Что выводится на экран.*

После вызова программы на экране покажутся рисунок установки Резерфорда для наблюдения рассеяния альфа-частиц, действующая схема той же установки, таблица с параметрами и поле для построения графика зависимости числа рассеянных частиц от величины угла рассеяния. В всплывающем окне задание: "Мы предлагаем Вам провести на компьютере эксперименты по рассеянию частиц с целью изучения строения атома. Первый опыт (первый выполнен Резерфордом в 1906 г.) заключается в измерении числа альфа - частиц N, рассеянных фольгой, в зависимости от угла рассеяния. Экспериментальную кривую можно будет затем сравнить с предсказаниями по методу Томсона (равномерное распределение положительного заряда в атоме) и Резерфорда (весь положительный заряд сконцентрирован в точечном ядре). Начните с выбора материала рассеивающей фольги и ее толщины. Затем измеряйте числа рассеянных альфа-частиц для разных положений детектора.

Не забывайте наносить результаты на график.

В строке сообщений - "Для продолжения нажмите клавишу <<Enter>>".

#### *Порядок работы.*

После нажатия клавиши <<Enter>> можно приступить к проведению компьютерного эксперимента: выбрать один из пяти материалов мишени, толщину мишени. Перебор осуществляется нажатием клавиш со стрелками вниз и вверх, а подтверждение выбора - клавишей <<Enter>>. Теперь установка готова к работе. Управление: нажатие клавиши <<G>> запускает установку на счет. При этом на табло, связанном с детектором, отражается рост числа зарегистрированных частиц. По окончании счета изменение чисел останавливается, и гасится индикатор счета.

Нажатие клавиши <<Enter>> отражает число зарегистрированных частиц на графике (при текущем угле установки детектора).

Клавиши со стрелками позволяют повернуть детектор (углы рассеяния от 0 до 150 градусов).

Для перехода к следующему упражнению следует нажать <<F8>>.



1			
4	7 7	8	8

Поскольку далее предполагается сравнение эксперимента с теорией, при числе измерений меньше 4 - выдается предупреждение: "Маловато точек для надежного выбора. Измеряем еще? У-да". Нажатие клавиши <<Y>> дает возможность продолжить измерения. В упражнении 2 компьютер рассчитывает и строит график зависимости числа рассеянных частиц от угла для моделей Томсона и Резерфорда. В левой части экрана схематично изображены атомы для обеих моделей, и показывается характер движения альфа-частиц для модели Томпсона углы рассеяния малы, для модели Резерфорда рассеяние интенсивней и редко, но встречаются углы отклонения больше 90 градусов. После счета компьютер предлагает Вам выбрать модель, которая дает результаты, соответствующие с экспериментальными, и предлагает задачу: оценить минимальное расстояние альфа-частиц от ядра при лобовом соударении. Исходные данные в задаче меняются при каждом запуске программы. Цель последнего, третьего упражнения - дать студенту представление о характере движения электронов и еще раз продемонстрировать составляющие метода изучения характеристик атомов и ядер: выбор модели движения, расчет результатов предполагаемого эксперимента, измерения, сравнение теоретических результатов с экспериментальными и заключение о пригодности модели.

На экране появляется задание: "Выберите одну из моделей движения электронов в атоме, проведите эксперимент. После сравнения теоретической и экспериментальной зависимостей числа рассеянных частиц N от угла рассеяния сделайте вывод о пригодности этой модели. Опробуйте другие модели". После чтения краткого описания установки выбираем одну из моделей движения электронов в атоме. Компьютер рассчитает и построит график распределения электронов по углам рассеяния. Затем можно провести "измерение" числа рассеянных электронов на атомах водорода. Опыт аналогичен тому, что проводился с альфа-частицами, клавиши управления те же. Результаты наносятся на график. Для сравнения можно затем построить теоретические кривые и для других моделей.

Итак, задаемся тем или иным характером движения электронов в атоме, рассчитываем распределение по углам рассеяния электронов, проводим эксперимент. После сравнения теоретической и экспериментальной зависимостей принимаем или отвергаем модель движения. В последнем случае задаемся новой моделью. Рассмотрим простейший атом - атом водорода в основном состоянии. В программе предусмотрена возможность анализа трех предложений о характере движения электронов в атоме:

1. равномерное распределение: электрон с одинаковой вероятностью встречается в любой точке атома.
2. атом Бора: электрон движется по кривой орбите с радиусом, а вероятность обнаружить его на любом другом расстоянии от ядра равна нулю;
3. электрон движется таким образом, как это следует из решения уравнения Шредингера.

Проведите эксперимент (компьютерный) по рассеиванию электронов на атомах водорода. Сопоставьте результаты с вычислениями по различным моделям. Сделайте выбор.

Вы убедитесь, что характер движения электрона в простейшем атоме водорода сложен, и модель Бора с движением по окружности не состоятельна.

#### *Задания к работе (Опыт Резерфорда).*

1. Установить зависимость числа рассеянных частиц от угла рассеяния (мишень выбрать потяжелее и потоньше). Произвести измерения и построить графики.
2. Установить зависимость числа рассеянных частиц от толщины мишени (мишень выбрать потяжелее, а угол рассеяния поменьше). Произвести измерения и построить график.
3. Установить зависимость числа рассеянных частиц от атомного номера материала мишени (сравнение провести в расчете на 1 атом мишени). Произвести измерения и построить график.
4. Прodelать компьютерный эксперимент с электронами.
5. Ответить (письменно) на вопросы к этой теме, размещенные на сайте.

#### *Контрольные вопросы.*

1. Модель атома Томпсона.
2. Какую задачу поставил перед собой Резерфорд? Его впечатления от полученных результатов.
3. Получите формулу Резерфорда.
4. Дайте определение, поясните смысл эффективного сечения рассеяния.
5. Каково угловое распределение заряженных частиц в результате однократного рассеяния? Изобразите качественно на графике.
6. Какие основные выводы были сделаны из опытов Резерфорда. Каков размер атома, ядра? Приведите наглядный пример.
7. Каково угловое распределение заряженных частиц, прошедших мишень при многократном рассеянии? Почему? Изобразите угловое распределение на графике.
8. Поясните назначение и взаимодействие отдельных узлов экспериментальной установки Резерфорда.
9. Качественно изобразите зависимости числа отраженных электронов от угла рассеяния в опыте № 2. Сравните с измеренным.
10. Какой вывод напрашивается из опыта №2.
11. Сравните модели атома Томпсона и Резерфорда.
12. Сравните модели атома Бора и Шредингера.
13. Изложите порядок работы.



( ) ) ,

1

1

4

7

8

9

8

#### УСТАНОВКА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ

В Вашем распоряжении находится установка для изучения фотоэффекта. Внутри отключенной трубки расположены две пластины, присоединенные к источнику напряжения, и в ту же цепь включен прибор для измерения тока. Величина светового потока регулируется диафрагмой.

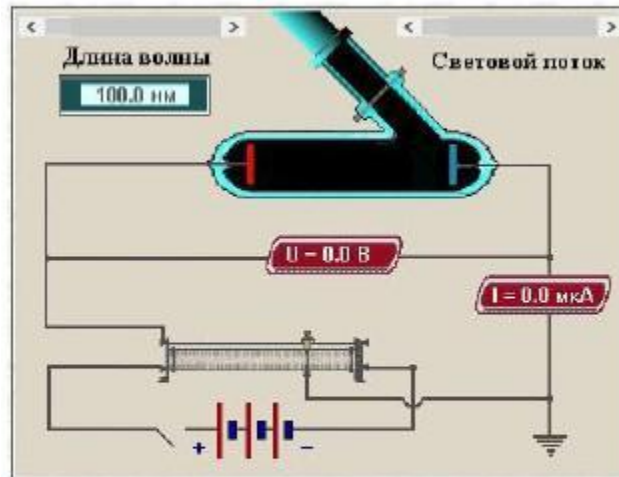


Рис. 4. Схема экспериментальной установки.

Свет от монохроматического источника падает на катод фотоэлемента. Задерживающий потенциал подается на анод и регулируется с помощью потенциометра П. Измеряются разность потенциалов катода и анода  $U$  и величина анодного тока  $I$ . В зависимости от положения

движка потенциометра напряжение может быть как ускоряющим электроны так и задерживающим. Световой поток регулируется шириной щели в шторке, закрывающей катод.

#### ЗАДАНИЕ ПО РАБОТЕ

В данной работе следует:

1. Выписать законы фотоэффекта и провести измерения, демонстрирующие их справедливость (последовательность измерений составляйте самостоятельно).
2. По результатам измерений найти работу выхода фотоэлектрона для материала катода, с которым проводились измерения, и вычислить постоянную Планка.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Запишите и объясните уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
2. В чем заключается метод задерживающего потенциала?
3. Что такое потенциал задерживания?



	0	1	0	0	1	
	5	7	8		8	

### Экспериментальная часть.

В данной работе следует:

1. Провести градуировку спектрометра по спектру ртути (длины волн спектра ртути считаем известными, они приведены ниже в таблице) и построить график длины волны - отсчет по барабану (n).

1.1. Поместите на рельс УМ-2 ртутную лампу. Включите ее.

Для этого:

1.1.1. Включите трехполосную вилку питания лампы в гнездо на боковой стенке пульта питания.

1.1.2. Включите тумблеры «Сеть» и «Лампа ДРШ» на пульте.

**ВНИМАНИЕ!** Ртутная лампа является источником ультрафиолетового излучения. Кроме того, во время работы в ней разливается давление до 30 атмосфер. Поэтому обращаться с ней следует осторожно.

1.2. С помощью конденсора 2 (F=94) сфокусируйте свет от лампы на входную щель спектрометра.

1.3. Установите затвор входной трубы в положение «Открыт».

1.4. Регулировкой окуляра найдите четкое изображение

стрелки-указателя.

1.5. Установите с помощью головки 4 ширину входной щели 0,05-0,1 мм.

1.6. Вращая барабан 8, совместите крайнюю фиолетовую линию спектра (первая фиолетовая) со стрелкой - указателем; снимите отсчет по барабану.

1.7. Совместите последующие спектральные линии со стрелкой - указателем, запишите их показания (n) по барабану 8. Результаты занесите в таблицу 1.

1.8. Постройте градуированный график.



1			
	5 7	8	8

Таблица 1.  
Наиболее яркие линии спектра ртути.

Линии спектра	Длина волны в ангстремах	Отсчет по шкале барабана (n)
Первая фиолетовая	4046	
Вторая фиолетовая	4078	
Синяя (самая яркая из семейства синих)	4358	
Первая голубая	4916	
Вторая голубая	4940	
Зеленая яркая	5461	
Желтая первая	5770	
Желтая вторая	5790	
Красная (последняя из красных)	6907	

**Примечание.** В таблице 1 приведены длины волн только наиболее ярких линий. В спектре имеются и другие линии, которые могут внести путаницу. Градуировочная кривая должна быть плавной. Выпадение точек из нее указывает на то, что либо отсчет по барабану взят ошибочно, либо неправильно определена спектральная линия (ей приписано неверное значение длины волны).

2. Определение постоянной Ридберга по спектру водорода.
  - 2.1. Вместо ртутной лампы установите водородную трубку и зажмите ее.
  - 2.2. Фокусируйте свет от трубки с помощью конденсора 2 на выходную щель спектрометра.
  - 2.3. Возьмите отсчеты по линиям водорода, определите длины волн соответствующих линий по градуировочному графику. Результаты измерений занесите в таблицу 2

Таблица 2.

Спектральные линии водорода

N	Цвет линии	n	Отсчет по шкале	Длина волны $\lambda$ , нм	$1/\lambda$	$1/n^2$

2.4. Постройте график зависимости  $1/\lambda = f(1/n^2)$ .

2.5. Рассчитайте, используя (1) постоянную Ридберга R методом наименьших квадратов и оцените точность ее определения. Окончательный результат запишите в виде

$$R = R \pm \Delta R$$

- 2.6. Методом наименьших квадратов определите величину R и оцените погрешность  $\Delta R$ .
- 2.7. Подсчитайте из (2) постоянную Планка. Определите ее погрешность, запишите окончательно



1			
		2	
5	7	8	8

$$\lambda = \bar{\lambda} \pm \Delta\lambda$$

### 3. Определение неизвестного газа по его спектру.

- 3.1. Поместите перед монохроматором указанный преподавателем источник света.
- 3.2. Возьмите отсчет по линиям его спектра, данные занесите в таблицу 3 и по справочным данным определите газ.

Таблица 3.

NN	Цвет линии	Отсчет по барабану	$\lambda, \text{Å}$

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Структура спектра водорода.
2. Что такое волновое число, как оно связано с частотой и длиной волны ?
3. Напишите формулу Бальмера, определите с её помощью линию спектра водорода.
4. Устройство монохроматора.
5. Порядок градуировки монохроматора.
6. Постулаты Бора.
7. Выведите формулу квантового значения энергии атома водорода и серийную формулу.

## 1

### ОПТИЧЕСКИЙ КВАНТОВЫЙ ГЕНЕРАТОР (ОКГ) НА СМЕСИ ГЕЛИЯ И НЕОНА.

Целью работы является изучение оптического квантового генератора (лазера), рабочим веществом в котором является смесь газов: гелия и неона. Главное отличие газовых лазеров от лазеров на твердых веществах состоит в различных методах возбуждения и подвода энергии накачки. Метод оптической накачки практически непригоден для газовых лазеров из-за отсутствия полос поглощения в газах. Ширина линий поглощения в атомарных газах мала по сравнению с полосами поглощения в твердых телах. Поэтому для того чтобы оптическая накачка была эффективной, необходимо, чтобы линии лампы накачки точно соответствовали линиям поглощения газа в лазере. Это означает, что для возбуждения обычные лампы накачки использовать нельзя, так как они дают излучение, близкое к излучению твердого тела. Спектральная плотность энергии излучения таких источников недостаточна для того, чтобы создать инверсную населенность.

Для создания инверсной населенности можно воспользоваться методом возбуждения атомов электронным ударом. Возбуждение атомов электронным ударом проще всего осуществить в газовом разряде, в котором возникают свободные электроны и ионы, т.е. возникает плазма. Электроны и ионы газоразрядной плазмы ускоряются полем разряда, приобретают кинетическую энергию. При взаимодействии электронов и ионов с атомами газов и между собой происходит перераспределение энергии. Обмен энергиями между ионами и атомами протекает интенсивно (так как их массы равны), поэтому средняя кинетическая энергия ионов практически равна средней энергии атомов. В газовом разряде низкого давления (несколько миллиметров ртутного столба) при упругих соударениях электронов с атомами и



1			
3	5	7	8
			8

ионами газа обмен энергией между ними практически не происходит (так как масса электрона значительно меньше массы атома). Поэтому в стационарном разряде между электронами (вследствие взаимодействия между ними) быстро устанавливается равновесное распределение, характеризуемое средней энергией, т.е. температурой  $T_e$ . Причем средняя энергия электронов оказывается существенно больше средней энергии атомов ( $T_e \gg T$ ). Убедимся в этом. Составим уравнение баланса энергии для электронов, считая, что проводимость плазмы обусловлена, в основном, движением электронов (из-за того, что  $M \gg m$ , скоростью ионов пренебрегаем по сравнению со скоростью электронов). Тогда Джоулево тепло, выделяемое в электронном газе, уравнивается передачей энергии от электронов ионам и атомам:

$$\sigma E^2 = \frac{n(T_e - T) m}{\tau M} \quad (7.36)$$

здесь  $\sigma = \frac{ne^2 \tau}{m}$  – проводимость;  $n$  – концентрация электронов;  $T_e$  – их температура, не равная температуре газа  $T$ ;  $\tau$  – время между двумя соударениями электронов с атомами;  $E$  – напряженность электрического поля в плазме. Множитель  $\frac{m}{M}$  ( $m$  – масса электрона,  $M$  – масса атома) отражает тот факт, что при упругом соударении электрон передает лишь долю  $\frac{m}{M}$  своей энергии. Из (7.36) получаем оценку для температуры электронов в плазме:

$$T_e = T + \frac{(eE\tau)^2 M}{m} \quad (7.37)$$

При величинах полей, реализующихся в положительных столбах разрядов низкого давления, температуры электронов, определяемые из (7.37), могут достигать значительных величин (~100 эВ). В действительности, однако, этого не происходит, поскольку по достижении энергий порядка энергий возбуждения уровней атомов они начинают сталкиваться неупруго, теряя при каждом соударении порцию энергии, равную энергии возбуждения уровня. Из-за неупругих соударений энергия электронов не может заметно превысить порог возбуждения атомов. Поэтому оценка электронной температуры (7.37), не учитывающая неупругие соударения, является завышенной. Однако именно высокие значения  $T_e$  в (7.37) являются предпосылкой того, что значительное количество электронов может приобретать в газовом разряде энергию, необходимую для возбуждения атомов. Поэтому в разряде найдется достаточное количество электронов, которые будут испытывать с атомами неупругие соударения, будут возбуждать и даже ионизировать их.

Если в разряде присутствует смесь двух газов, то при соударении двух различных атомов может происходить обмен энергией возбуждения, если при этом атомы обладают близко расположенными уровнями. В этом случае практически вся энергия возбуждения первого атома переходит в энергию возбуждения второго, и лишь малая ее часть переходит в кинетическую энергию сталкивающихся частиц. При этом ранее возбужденный атом в результате такого соударения беззатратно переходит в основное состояние. Особый интерес представляет случай, когда обмен энергией происходит между атомом, находящимся в метастабильном состоянии, и невозбужденным атомом. В этом случае существует возможность передачи энергии возбуждения с сильно населенного метастабильного уровня атомов одного газа атомам другого газа, что может привести к созданию инверсной населенности их уровней. Именно такой метод получения инверсной населенности использован в газовом лазере, активным веществом в котором служит смесь гелия с неоном. В этом лазере активными частицами являются атомы неона, между уровнями которого осуществляется инверсия, а атомы гелия служат для создания эффективной накачки верхнего лазерного уровня атомов неона. Этот лазер получил широкое распространение в технике и лабораторной практике. На рис. 7.6 приведена диаграмма низших энергетических уровней атомов гелия и неона.



1			
4	5	7	8

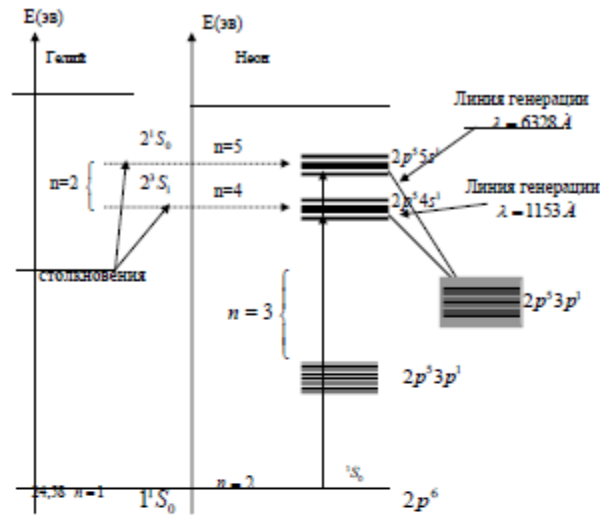
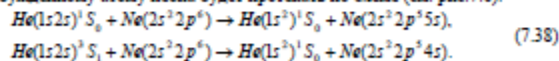


Рис. 7.6. Диаграмма низших энергетических уровней He и Ne

Уровни  $2^1S_0$  и  $2^3S_0$  гелия – метастабильны, прямой радиационный переход в основное состояние  $1^1S_0$  запрещен. Основное состояние атома неона соответствует электронной конфигурации  $1s^2 2s^2 2p^6$  и имеет терм  $1^1S_0$ . Выше (на  $-16,7$  эВ) основного состояния расположены четыре подуровня, соответствующие электронной конфигурации  $2s^2 2p^3 3s$ . Далее расположена группа из 10 подуровней, соответствующая электронной конфигурации  $2s^2 2s^2 3p$  и т.д. (см. рис. 7.6, на нем не указаны подуровни, соответствующие электронным конфигурациям  $2s^2 2s^2 4p$ ,  $2s^2 2s^2 3d$ ). При столкновении атомов гелия, находящихся в метастабильных состояниях  $2^1S_0$ ,  $2^3S_0$ , с атомами неона, находящимися в основном состоянии, возможна передача энергии возбуждения атому неона. При этом, поскольку вероятность обмена энергией возбуждения между атомами тем больше, чем ближе друг к другу расположены их уровни, атом неона перейдет на один из уровней  $2p^3 4s$  или  $2p^3 5s$ , а атом гелия вернется в основное состояние. То есть процесс резонансной передачи энергии возбужденного атома гелия невозбужденному атому неона будет протекать по схеме (см. рис. 7.6).



Таким образом, уровни  $2p^3 4s$  и  $2p^3 5s$  неона будут населяться не только за счет электронных ударов, но главным образом за счет столкновений атомов неона с возбужденными атомами гелия.

Число соударений, при которых происходит процесс резонансной передачи энергии, пропорционально концентрации сталкивающихся частиц в исходных состояниях, т.е. скорость заселения верхних лазерных уровней неона пропорциональна концентрации невозбужденных атомов неона заселенности метастабильных состояний  $2^1S_0$  и  $2^3S_0$  атомов гелия. Большое время жизни атомов гелия в этих состояниях обуславливает высокую заселенность этих



1			
5	7	8	8

состояний и, в конечном итоге, достаточно высокую скорость заселения верхних лазерных уровней неона  $2S^2 2P^3 5S$  и  $2S^2 2P^3 4S$ . Система верхних лазерных уровней имеет общие нижние уровни  $2S^2 2P^3 3P$ , имеющие достаточно большую вероятность радиационного перехода на более низкие  $2S^2 2P^3 3S$  уровни, и, следовательно, малое время жизни. Всё это и обеспечивает выполнение условия инверсной населённости:

$$\Gamma_{31} \tau_{31} > \Gamma_{21} \tau_{21}. \quad (7.39)$$

описанный механизм заселения уровня обеспечивает получение инверсной населённости между парами подуровней  $2P^3 5S \rightarrow 2P^3 3P$  (дающей излучение с длиной волны  $(\lambda_1 = 6328 \text{ \AA})$  и  $2P^3 4S \rightarrow 2P^3 3P$  ( $\lambda_2 = 11523 \text{ \AA}$ ), допуская возможность генерации на двух переходах. Поскольку возбужденные уровни  $3s$ ,  $2s$  и  $2p$  неона являются сложными мультиплетами, то между компонентами многих из них возможны переходы, возможна генерация).

Таким образом ОКГ на смеси гелия и неона работает на четырехуровневой энергетической схеме, что дает возможность осуществления стационарной генерации излучения. В режиме стационарной генерации инверсная населённость равна пороговой  $\Delta N_{\text{пр}}$ , определяемой по формуле

$$\Delta N_{\text{пр}} = \frac{1-R}{2L\sigma} + \frac{\chi}{\sigma}, \quad (7.40)$$

где  $\Delta N = N_2 - N_1$ ;  $N_2$  и  $N_1$  – заселённости верхнего и нижнего лазерного уровней соответственно;  $L$  – размер активного элемента;  $\sigma$  – сечение фотопоглощения;  $R$  – коэффициент отражения полупрозрачного (выходного) зеркала;  $\chi$  – коэффициент поглощения в веществе, не связанный с переходом  $1 \rightarrow 2$ .

Из (7.40) следует, что для того, чтобы при данных условиях эксперимента (разряда, длины трубки) имела место генерация на переходе  $2 \rightarrow 1$ , необходимо, чтобы резонатор обладал определенной добротностью (зависящей от  $R$ ). Таким образом, применяя зеркала с различными диэлектрическими покрытиями (различными  $R$ ), можно на одной и той же трубке со смесью гелия и неона наблюдать генерацию на различных длинах волн.

Зеркала резонатора могут быть либо плоскими (как в интерферометре Фабри-Перо), либо сферическими, с радиусом кривизны, значительно превышающим длину резонатора, либо комбинацию того и другого. Для газовых лазеров часто используют сферические зеркала. Они имеют некоторые преимущества, в основном связанные с более простой их юстировкой по сравнению с плоскими, где необходимо поддерживать параллельность зеркал с точностью до нескольких секунд. При юстировке зеркала выставляются соосно, что увеличивает эффективный коэффициент отражения зеркал и, следовательно, уменьшает пороговую инверсию.

#### *Лазерные технологии.*

Лазеры нашли широкое применение, и в частности используются в промышленности для различных видов обработки материалов, металлов, бетона, стекла, тканей, кожи и т.п.

Лазерные технологические процессы можно условно разделить на два вида. Первый из них использует возможность чрезвычайно тонкой фокусировки лазерного луча и точного дозирования энергии как в импульсном, так и в непрерывном режимах. В таких технологических процессах применяют лазеры сравнительно невысокой средней мощности: это газовые лазеры импульсно-периодического действия, лазеры на кристаллах иттрий-алюминиевого граната с примесью неодима. С помощью последних были разработаны сверления тонких отверстий (диаметром 1-10 мкм и глубиной до 10-100 мкм) в рубиновых и алмазных камнях для часовой промышленности и технология изготовления фильеров для протяжки тонкой проволоки. Основная область применения маломощных импульсных лазеров связана с резкой и сваркой миниатюрных деталей в микроэлектронике и электровакуумной



1			
5 67		8	
		8	

промышленности, с маркировкой миниатюрных деталей, автоматическим выжиганием цифр, букв, изображений для нужд полиграфической промышленности.

В последние годы в одной из важнейших областей микроэлектроники – фотолитографии, без применения которой практически невозможно изготовление сверхминиатюрных печатных плат, интегральных схем и других элементов микроэлектронной техники, обычные источники света заменяются на лазерные. С помощью лазера на  $\text{XeCl}$  ( $\lambda = 308 \text{ нм}$ ) удается получить разрешение в фотолитографической технике до  $0,15\text{-}0,2 \text{ мкм}$ .

Дальнейший прогресс в субмикронной литографии связан с применением в качестве экспонирующего источника света мягкого рентгеновского излучения из плазмы, создаваемой лазерным лучом. В этом случае предел разрешения, определяемый длиной волны рентгеновского излучения ( $\lambda \approx 0,01 - 0,001 \text{ мкм}$ ), оказывается просто фантастическим.

Мощные лазеры используют в таких энергоёмких процессах, как резка и сварка толстых стальных листов, поверхностная закалка, наплавление и легирование крупногабаритных деталей, очистка зданий от поверхностных загрязнений, резка мрамора, гранита, тканей, кожи и других материалов. При лазерной сварке металлов достигается высокое качество шва и не требуется применения вакуумных камер, как при электронно-лучевой сварке, а это очень важно в конвейерном производстве.

Мощная лазерная технология нашла применение в машиностроении, автомобильной промышленности, промышленности строительных материалов. Она позволяет не только повысить качество обработки материалов, но и улучшить технико-экономические показатели производственных процессов. Так, скорость лазерной сварки стальных листов толщиной  $14 \text{ мм}$  составляет  $100 \text{ м/ч}$ .

С развитием все более мощной лазерной техники энергия лазерного излучения стала все шире использоваться наряду с другими традиционными видами энергии (энергией электрического тока, механической энергией, энергией химических процессов).

#### *Постановка эксперимента.*

Данная лабораторная работа реализована в виде программного комплекса для IBM PC. Как запустить программный комплекс из операционной системы смотри в Приложении.

#### *Контрольные вопросы*

1. Спонтанное и вынужденное излучение. Поглощение.
2. Энергетические уровни атомов и молекул и переходы между ними.
3. Источники электромагнитных излучений оптического диапазона и их характеристики.
4. Населенность уровней, время жизни на уровне, инверсная населенность.
5. Накачка лазеров, виды накачки.
6. Устройство лазера и принципы его действия.
7. Параметры лазерного излучения.
8. Применение лазеров и их технические характеристики.
9. Оценить  $\text{min}$  энергию накачки лазера с  $\Delta E_{1,2} = 2 \text{ эВ}$ , содержащего  $0,001$  моль активных центров при  $T = 3000 \text{ К}$ .
10. Оценить  $\text{max}$  возможную энергию импульса для  $\text{CO}_2$  ( $\lambda = 1100 \text{ нм}$ ) содержащего  $1$  грамм углекислого газа.
11. Поляризация света. Каким образом поляризованы отдельные фотоны света.



( ) ) ,

1

1

5 7

8

8

Экспериментальная установка

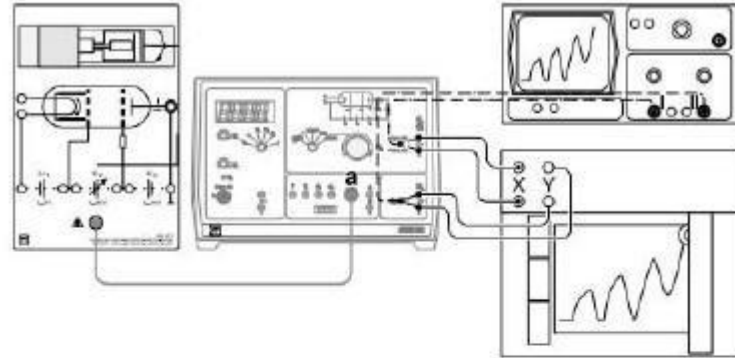


Рис.4 Установка для проведения опыта Франка и Герца.

В лаборатории используются два модуля: держатель неоновой лампы (изображен слева на рисунке) и измерительный блок (в центре).

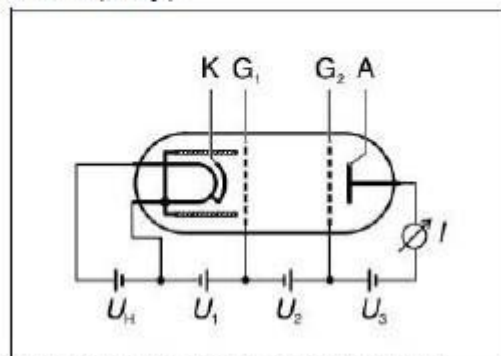


Рис.5 Включение неоновой лампы в опыте Франка и Герца.

Лампа наполнена неоном при давлении примерно 100 Па. В стеклянной трубке 4 электрода. Управляющий электрод  $G_1$  расположен в непосредственной близости от катода К, ускоряющая сетка  $G_2$  установлена на большем расстоянии; собирающий электрод А вблизи сетки. Катод подогревается. Роль сетки  $G_1$  состоит в уменьшении влияния пространственного заряда на вид измеряемой вольтамперной характеристики. Небольшая разность потенциалов



( ) ) ,

1

1

5 7 7

8

8

(единицы вольт)  $U_1$ , прикладываемая между катодом и первой сеткой, создает электрическое поле, эффективно удаляющее электроны из прикатодной области. В следствии этого число электронов, попадающих в пространство между сетками  $G_1$  и  $G_2$  практически не зависит от напряжения  $U_1$ .

#### Проведение измерений

1. Установите значения напряжений  $U_1 = 2$  В,  $U_3 = 5$  В.
2. Снимите вольт-амперную характеристику: измерьте ток анода при различных значениях напряжения  $U_2$  с шагом 1 В от нуля до 50 В.
3. Повторите измерения по пункту 2 с другими напряжениями  $U_1$  и  $U_3$ , указанными преподавателем.
4. Постройте графики  $I = f(U_2)$  и определите положения максимумов.
5. Вычислите энергию возбуждения атомов неона и её погрешность. Сравните значения с табличными.

#### Измерения на компьютерной модели.

Предполагаемый эксперимент состоит в следующем.

- Опыт 1. Определение первого потенциала возбуждения атома.
- Опыт 2. Исследование энергетических уровней атома и определение потенциала ионизации.
- Опыт 3. Исследование спектра возбужденных атомов.

Запустите программный комплекс «Атомная и ядерная физика».

#### Что выводится на экран.

Вы работаете с компьютерной моделью установки в известном опыте Фрэнка и Герца: снимаете вольт-амперную характеристику, определяете по ней первый потенциал возбуждения атома какого-либо вещества, находите энергетические уровни атома, получаете и исследуете спектр некоторых элементов. По ходу работы компьютер предлагает несколько вопросов. Текущие сообщения по работе с программой помещаются в нижней строке экрана.

#### Порядок работы.

После вызова программы из меню на экране появится схема и описание установки для опыта 1: «Из трубки выкачан воздух и в нее введено небольшое количество ( $p=1$  мм рт. ст.) атомов какого-либо вещества. Электроны, испускаемые накалившимся катодом (1), ускоряются в постоянном электрическом поле, созданном между катодом и сетчатым анодом (2). Третьим электродом является коллектор (3). Между ним и анодом поддерживается небольшое (1В) задерживающее напряжение. Поэтому до коллектора могут дойти только те электроны, энергия которых больше 1эВ. Ток коллектора, пропорциональный числу попадающих на него за секунду электронов, измеряется микроамперметром. С помощью реостата (4) можно изменять ускоряющее напряжение  $U$ ».

При нажатии клавиши ESC появится поле для графика  $I=f(u)$  и задание 1: «Плвно изменяйте напряжение от 0 до 12 В и стройте график зависимости  $I=f(u)$ ».



( ) ) ,

1

1

5

7

8

9

8

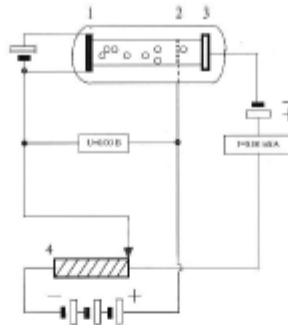


Рис. 2.4 Принципиальная электрическая схема установки

Необходимые для работы клавиши указаны в строке сообщений. При построении графика Вы убедитесь, что передача энергии от электрона к атому существенно зависит от энергии электронов. Пока энергия электронов меньше некоторого определенного значения, электроны вовсе не теряют энергии при соударении с атомами, и ток в цепи растет пропорционально приложенному напряжению. Но когда энергия электронов достигнет (или будет немного больше) определенного значения, потеря энергии при соударениях сразу становится большой и «ослабевшие» электроны не могут преодолеть задерживающей разности потенциалов. Ток в цепи резко падает. Наименьшее количество энергии, которое может быть воспринято атомом, называется его наименьшей энергией возбуждения. Эти порции энергии характерны для каждого атома. При дальнейшем увеличении потенциала анода ток коллектора вновь возрастает: электроны, испытавшие неупругие столкновения, успевают набрать энергию, достаточную для преодоления задерживающего потенциала. Следующее замедление роста тока происходит, например, в момент, когда часть электронов неупруго сталкивается с атомами два раза: первый раз посередине пути, второй у анода и т.д. После построения графика  $I=f(U)$  Вам будут заданы вопросы:

«Определите, при каких значениях энергии электронов (в эВ) наблюдаются спады тока? На сколько эти значения энергии отличаются друг от друга? Полученное значение введите в качестве ответа».

Определением первого потенциала возбуждения атома заканчивается первый опыт. Во втором упражнении Вы познакомитесь с понятием энергетических уровней атома.

При переходе ко второму упражнению Вы получите вопрос-задание: «Внутренняя энергия атома изменяется ступенями. В предыдущем опыте мы нашли только наименьшую величину этой ступени. Но единственная ли она? В нашей установке понизим давление на порядок, чтобы исключить вероятность возбуждения одним и тем же электроном нескольких атомов. Каждый электрон может отдать часть своей энергии лишь одному атому. Увеличивайте ускоряющее напряжение до предела, найдите и запишите другие значения энергии электронов, при которых возможна передача энергии атомам данного вещества».

Активные клавиши перечислены в строке сообщения. Параллельно с проведением опыта (для создания наглядного образа) проводится «обстрел» атома-мишени бомбардирующими частицами. При совпадении энергии частицы с уровнем возбуждения (при «попадании») модель атома вспыхивает соответствующим цветом. По завершении опыта появляется вопрос: «Введите значение энергии ионизации в эВ.» После ввода Вашего ответа компьютер сообщает



( ) ) ,

0 1 . 0 . - 0 1 . - ) )

67

8

8

правильный ответ и выдает вопрос: "Атомы какого вещества использовались в вашем эксперименте?"

Используя полученные значения потенциала ионизации атома, надо найти по таблице используемое вещество и ввести в качестве ответа его химический символ.

Таблица энергии ионизации, эВ

H – 13.59	Na – 5.14	Cs – 3.89
He – 24.58	Ar – 15.75	Ag – 7.58
Li – 5.34	K – 4.34	Hg – 10.44
B – 8.30	Cu – 7.72	Ne – 21.56

На этом заканчивается опыт 2.

В третьем упражнении существование уровней энергии убедительно подтверждается совершенно иными средствами измерения. При бомбардировке газа электронами наблюдается свет, испускаемый газом. При низких энергиях бомбардирующих электронов мы не видим свечения газа. Но при переходе через наименьшую энергию возбуждения свет внезапно появляется. Исследуя этот свет с помощью спектроскопа, мы видим резкую линию, указывающую на излучение света с определенной длиной волны и частотой, т.е. указывающую на фотоны какой-то одной энергии. Длина волны  $\lambda$  излучения должна быть равна

$$\lambda = \frac{hc}{eU},$$

где  $h$  – постоянная Планка,  
 $c$  – скорость света,  
 $e$  – заряд электрона,  
 $U$  – ускоряющее напряжение.

Если бы энергия возбуждения атома могла быть любой, то был бы виден свет с большими длинами волн. Следовательно, опыт со спектроскопом показывает, что атомы не только принимают от электронов определенное количество энергии, но что, возвращаясь в нормальное состояние, они в данном случае могут излучать только в точности то же количество энергии. Как, получая энергию от электронной бомбардировки, так и испуская энергию в виде света, атомы одним скачком совершают переходы между двумя энергетическими состояниями.

Продолжим опыт со спектроскопом. Увеличим энергию, с которой электроны бомбардируют атомы, и будем наблюдать свет, который они испускают. По мере увеличения энергии бомбардировки появятся остальные линии спектра данного вещества. Они появляются по мере того, как энергия бомбардировки последовательно повышается над порогам возбуждения все более и более высоких энергетических состояний. Следовательно, такой способ позволяет, как бы разделить спектр вещества и наблюдать, как он возникает. Энергия испущенного фотона равна, разности между начальной и конечной внутренней энергией атома при его переходе из одного состояния в другое. При возвращении атома в основное состояние он может излучить фотон с большой энергией или, возможно, несколько фотонов с энергиями, равными разностям энергий между несколькими внутренними энергетическими состояниями, в которых может существовать атом. В излучении фотонов, как и во всех известных нам процессах, энергия сохраняется. Обратите внимание на то, что линии большей длины волны соответствуют переходам между состояниями, которые оба находятся выше основного состояния. Разности их энергий меньше, так что испущенные фотоны обладают более низкой частотой и большей длиной волны. Однако для получения таких длинноволновых линий атомы должны быть сначала переведены в более высокие энергетические состояния. Так можно объяснить явление, которое иначе представляется странным: длинноволновые линии образованы фотонами с малыми энергиями, но для их получения требуются электроны с большими энергиями.



1			
	67	8	8

Войдя в третье упражнение, Вы получите задание: "В этом эксперименте возбуждение энергетических уровней ударом можно обнаружить оптическим путем. Повышайте ускоряющее напряжение до предела и определите энергетические уровни атомов данного вещества. Одновременно наблюдайте за образованием спектра с помощью спектроскопа". По достижении энергии ионизации студент получает вопрос: "Кванты какой энергии (в эВ) соответствует выделенному периоду?" В это время на схеме энергетических уровней один из переходов определенным образом выделяется среди остальных. Вы вводите ответ, а компьютер его комментирует. Затем следует вопрос: "Какова длина волны (в нм) данной линии излучения?" И снова Вы после ввода ответа получите комментарий компьютера о правильности или неправильности ответа. Но Вы можете закончить изучение темы или повторить понравившиеся Вам опыты.

В отчете по работе привести: схему измерений, данные измерений  $I=f(u)$  и график  $I=f(u)$ ; ответы на вопросы 8, 10, 12, 15.

#### Контрольные вопросы.

1. В чем заключается основная идея опытов Франка и Герца.
2. Сформулируйте постулаты Бора.
3. Что понимается под упругими или неупругими соударениями электронов с атомами?
4. Изобразите принципиальную электрическую схему Вашего опыта в данной лабораторной работе.
5. Изобразите вольт-амперную характеристику трубки с горячим катодом:
  - а) в отсутствии паров ртути;
  - б) в присутствии паров ртути.
6. На каких участках ВАХ электроны испытывают упругие соударения, а на каких – неупругие соударения? Почему?
7. Каким именно образом результаты опытов Франка и Герца подтверждают постулаты Бора?
8. Чем отличается нормальный атом от атома возбужденного?
9. В возбужденном состоянии атом долго не остается. Что происходит при переходе с его электронной оболочкой?
10. Чем отличаются атомы нити горячей электрической лампы от атомов нити этой же лампы в холодном состоянии?
11. Найдите энергию фотона с частотой колебаний световой волны  $10^{15}$  Гц.
12. Какова длина волны фотона с энергией 3эВ?
13. Почему атом может принять любую порцию энергии, если она превышает энергию ионизации?
14. Длина волны красного света 800 нм, желтого 600 нм, фиолетового 400 нм. Найдите соотношение энергий их фотонов.
15. Почему длинноволновые линии образованы фотонами с малыми энергиями, но для их получения требуются возбуждающие электроны с большими энергиями?
16. Изложите порядок работы.

## 1 00

#### Методика эксперимента.

Из уравнения (10) видно, что для определения периода полураспада долгоживущего изотопа необходимо измерить число радиоактивных ядер в образце  $n_0$  и активность образца  $A$ .

#### Измерение числа ядер изотопа $^{40}\text{K}$ в образце.

Известно, что в естественной смеси изотопов калия на долю  $^{40}\text{K}$  приходится 0,0119%. По массе образца соли KCl следует определить количество содержащегося в нем природного калия, а затем рассчитать массу  $m_k$  изотопа  $^{40}\text{K}$ , учитывая его процентное содержание в природном калии. Таким образом, число атомов радиоактивного  $^{40}\text{K}$  определится выражением:

$$n_0 = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot m_k^{40}}{40} \quad (11)$$

где:

$6,02 \cdot 10^{23}$  - число Авогадро,

$m_k^{40}$  - масса радиоактивного  $^{40}\text{K}$  в природном калии в граммах,

40 - масса одного грамма - атома изотопа  $^{40}\text{K}$  в граммах.

#### Измерение $\beta$ - активности образца.



1	2	3	4	5	6	7	8
67	8	8	8	8	8	8	8

Для определения активности образца используется установка со счетчиком  $\beta$ -частиц. Эффективность регистрации  $\gamma$ -излучения, сопровождающего захват электрона, мала, и можно считать, что срабатывание регистрирующего устройства вызвано только  $\beta$ -частицами.

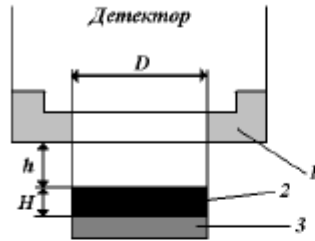


Рис.4.2  
Схема расположения счетчика  $\beta$ -частиц (1) и радиоактивного препарата (2) на подложке (3).

На рис.4.2 приведена схема расположения радиоактивного образца и счетчика. Видно, что только часть излучения попадет в рабочий объем счетчика. Поэтому, для определения активности по измеренной скорости счета установки необходимо ввести поправку на телесный угол. Кроме того, необходимы поправки на фон счетчика, поглощение  $\beta$ -частиц в воздухе и окошке счетчика, поглощение и рассеяние  $\beta$ -частиц в воздухе и окошке счетчика, поглощение и рассеяние  $\beta$ -частиц в самом образце и разрешающее время счетчика. Рассмотрим, как учесть все эти факторы и выведем формулу для подсчета  $A$  - активности образца  $\left[ \frac{\text{числ}}{\text{сек}} \right]$ .

**Поправка на телесный угол.**

Поправка на телесный угол определяется как отношение числа частиц, испускаемых в направлении рабочего объема счетчика,  $I_0$ , к полному числу частиц, испускаемых препаратом в единицу времени во всех направлениях  $I_n$ :

$$\mathcal{E} = \frac{I_0}{I_n} \quad (12)$$

Она рассчитывается из геометрических соображений и приведена в нижеприведенной таблице поправок. Для наложения поправки нужно узнать отношение диаметра препарата  $d$  к диаметру входного окошка счетчика  $D$  (что определит столбец таблицы) и отношение расстояния от окошка счетчика до препарата  $h$  и радиуса окошка  $D/2$  (что определит строку таблицы).

Таблица поправок на телесный угол  $\mathcal{E}$ .

$\frac{d}{D}$	0,0	0,35	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
---------------	-----	------	------	------	------	------	------



( ) ) ,			
1 . . . . . 1 . . . . .			
3	67	8 . . . . .	8

$\frac{2h}{D}$							
1,5	0,081	0,809	0,0778	0,0750	0,0700	0,0647	0,0584
1,75	0,0645	0,0644	0,08627	0,0610	0,0568	0,0536	0,0492
2,0	0,0527	0,0525	0,0511	0,0501	0,0466	0,0448	0,0424
2,5	0,0354	0,0353	0,0348	0,0332	0,0326	0,0320	0,0302
3,0	0,0256	0,0255	0,0250	0,0242	0,0240	0,0238	0,0230

**Поправка на фон счетчика.**

Фон счетчика - это отсчеты в отсутствие исследуемого излучения, вызываемые космическим излучением, несовершенством своего счетчика,  $\gamma$ -излучением почвы, стен здания и т.п. В нашем случае это регистрация счетчиком  $\gamma$ -излучения самого препарата. Поскольку проникающая способность всех излучений, кроме измеряемого  $\beta$ -излучения, велика, для определения суммарного фона проводится дополнительное измерение скорости счета  $I_\beta$  при наличии между радиоактивным препаратом и счетчиком пластины из оргстекла толщиной 0,5 см, задерживающей все  $\beta$ -частицы. Число  $\beta$ -частиц определяется как разность числа отсчетов в отсутствие и при наличии фильтра:

$$I = I_0 - I_\beta \quad (13)$$

**Поправка на поглощение  $\beta$ -частиц в воздухе, входном окошке счетчика.**

Она представляет собой отношение числа частиц, вылетевших в направлении рабочего объема счетчика  $I_\alpha$ , к числу достигших его  $I_\beta$ :

$$K = \frac{I_\alpha}{I_\beta} \quad (14)$$

При известном спектральном составе  $\beta$ -излучения:

$$I_\beta = I_0 \exp(-\mu \rho t), \quad (15)$$

где:

$\rho t = \rho_{\text{возд}} h + \rho_0 t_{\text{ок}} -$  толщина слоя поглощения между препаратом и счетчиком в

$\frac{\text{г}}{\text{см}^2}$ ;

$\mu -$  коэффициент поглощения в  $\frac{1}{\text{см}^2}$ ;

$\rho_{\text{возд}}, \rho_0 -$  плотности воздуха и входного окошка счетчика в  $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ ;

$t_{\text{ок}} -$  толщина входного окна в см.

Коэффициент поглощения рассчитывается по эмпирической формуле:

$$\mu = 17 \cdot E^{-1,08},$$

где:

$E -$  максимальная энергия  $\beta$ -частиц в МэВ.

Поправка на самопоглощение и рассеяние  $\beta$ -излучения в толстом образце определяется отношением числа частиц, вышедших из активного слоя, к полному числу частиц, возникающих в источнике. Упрощенную оценку можно получить по приближенной формуле:



4	67	8	8
---	----	---	---

$$K_c = \frac{1}{\mu H \rho} (1 - e^{-\mu H \rho}), \quad (16)$$

где:

$\mu$  - коэффициент поглощения материала источника ( $\text{см}^2/\text{г}$ );

$H$  - высота источника ( $\text{см}$ );

$\rho$  - плотность образца ( $\text{г}/\text{см}^3$ ).

Поправка на разрешающее время необходима, чтобы учесть просчеты, связанные с кратковременной потерей чувствительности детектора при регистрации частицы. Так называемое "мертвое время"  $\tau$  составляет примерно  $3 \cdot 10^{-4}$  секунды для счетчика Гейгера и порядка  $10^{-4}$  секунды для сцинтилляционного детектора. Скорость счета  $I$  равна произведению скорости поступления частиц  $I_0$  на время, в течение которого счетчик приспособлен к регистрации. Это время за одну секунду работы счетчика составляет  $1 - \tau I_0$  сек. Отсюда  $I_0(1 - \tau I_0) = I$ , следовательно:

$$I_0 = \frac{I}{1 - \tau I} \quad (17)$$

Порядок расчета активности по измеренной скорости счета  $I$  от радиоактивного препарата следует принять следующий:

- 1) Ввести поправку на разрешающее время и получить  $I_0$ ;
- 2) Вычитать фон с учетом мертвого времени;
- 3) Учесть телесный угол;
- 4) Учесть поглощение  $\beta$ -частиц

$$A = \frac{(I_0 - I_f) \omega}{\omega \tilde{\epsilon}_\beta} = \frac{(I_0 - I_f) e^{\mu t} \mu H \rho}{\omega (1 - e^{-\mu H \rho})} \quad (18)$$

Однако, можно исключить измерение высоты источника  $H$ , если известна масса соли калия  $m$  и площадь образца  $S_0$ , тогда активность:

$$A = \frac{(I_0 - I_f) e^{\mu t} \mu m}{\omega S_0 (1 - e^{-\mu t / \epsilon_\beta})} \quad (19)$$

где:

$I_0$  - значение интенсивности, замеренное у образца без алюминиевого фильтра в  $\text{ИМН}/\text{сек}$ ;

$I_f$  - значение интенсивности, замеренное у образца с алюминиевым фильтром в  $\text{ИМН}/\text{сек}$ ;

$\mu$  - коэффициент поглощения в  $\text{см}^2/\text{г}$ ;

$\rho t$  - слой поглощения в  $\text{г}/\text{см}^2$ ;

$\omega$  - поправка на телесный угол;

$S_0$  - площадь образца в  $\text{см}^2$ ;

$A$  - активность в  $\text{ИМН}/\text{сек}$ ;



			( )	( )
			1	1
			)	)
	5	67	8	8

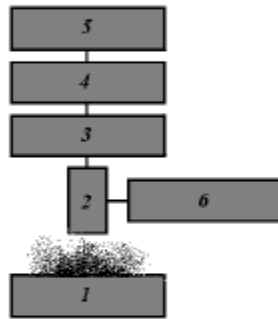
Погрешность определения периода полураспада обусловлена случайным характером распада, приближениями, сделанными при выводе ряда расчетных формул, и погрешностями прямых измерений длин, расстояний, веса и т.п. Поскольку распадается или не распадается данное ядро - дело случая, случайным оказывается и число распадов ядер за фиксированное время. Известен закон распределения числа случайных событий - закон Пуассона. Если число зарегистрированных отсчетов  $I$ , то среднеквадратичная ошибка равна

$$\sigma = \sqrt{I}$$

Величина поправки, получаемая по формуле (16), может отличаться от действительного значения до  $\pm 20\%$ . С такой же точностью известно значение мертвого времени счетчика. Погрешность значений коэффициента поглощения  $\mu$  равна 3%. Погрешность остальных величин, определяемых при выводе периода полураспада, зависит от используемых инструментов и приборов.

Погрешность окончательного результата находится как погрешность косвенного измерения.

#### Экспериментальная установка.



Источником является источник <sup>40</sup>K в образце. Счетчик (2) газоразрядного типа с выходом счетчика после предварительного на регулятор (5), который фиксирует число пришедших импульсов за установленное экспериментатором временем. Высокое напряжение, необходимое для работы счетчика подается с блока (6).

#### Порядок работы.

Все измеренные величины выразить в физической системе (см., г., сек.).

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой и подготовить её к работе: включить питание регистратора и источника высокого напряжения, затем с задержкой 5 мин. установить рабочее напряжение на счетчике (величину указывает преподаватель).
2. Установить препарат соли калия перед входным окном счетчика.
3. Запустить установку и оценить время, за которое будет зарегистрировано примерно 500 импульсов. В течение этого времени провести счет импульсов.
4. Между препаратом и счетчиком установить фильтр и произвести измерение фона за это же время.
5. Определить необходимые установки в образце.
6. Рассчитать активность по формуле (19), разделить на 0,68, чтобы учесть распады с захватом электрона и вылетом  $\gamma$  - излучения.
7. Определить число радиоактивных атомов <sup>40</sup>K в образце по формуле (11).
8. Найти период полураспада из формулы (10). Оценить погрешность.

#### Контрольные вопросы:

- 1) Тип излучения, дающий информацию о радиоактивном распаде соли KCl. Схема распада. Спектр  $\beta$  - частиц, Нейтрино.
- 2) Что мы понимаем под " $\beta$  - частицей"?
- 3) Какова масса  $\beta$  - частиц? Сравните с массой протона.
- 4) Тип распада. Основной закон радиоактивного распада.
- 5) Период полураспада. Радиоуглеродный анализ.
- 6) Поясните смысл величин, входящих в закон радиоактивного распада.
- 7) Как определить период полураспада короткоживущего изотопа.
- 8) Почему метод определения периода полураспада, применяющийся в работе, не используется для определения  $T_{1/2}$  короткоживущего изотопа.
- 9) Поправка на телесный угол. С какой целью введена и как рассчитывается?
- 10) Поправка на фон. В чем её смысл?
- 11) Поправка на самопоглощение. Как введена и как рассчитывается?
- 12) Поправка на поглощение в воздухе, входном окне, как рассчитывается.
- 13) Поправка на разрешающее время.
- 14) Назначение основных блоков установки.
- 15) Как рассчитывается количество радиоактивных ядер в образце?



34	5	67	8

## 1 0

«Компьютер моделирует работу ядерного реактора. В активной зоне реактора помещены стержни, содержащие уран, и графит, служащий для замедления нейтронов. Активная зона окружена отражателем – стенками из графита для уменьшения потерь нейтронов за счет вылета. Для регулирования интенсивности протекания реакции деления, в активную зону введены стержни, содержащие материал сильно поглощающий нейтроны. В исходном положении стержни опущены, поглощение велико и цепная реакция прекращена. Основная система охлаждения выключена. Скорость теплоносителя не более 5,4 от номинальной. На экран дисплея выведены показания датчиков температуры активной зоны  $T_a$ , выделяемой мощности  $БЧ$ , потока нейтронов в реакторе  $P$ , скорости движения теплоносителя  $ч$ . Ваша задача: изменяя положение регулирующих стержней и скорость движения теплоносителя, вывести реактор на рабочий режим с мощностью около 160 МВт, а затем вернуть реактор в исходное состояние допустив перегрева реактора!»

Указанное значение мощности меняется от запуска к запуску. На экране слева изображение активной зоны реактора с необходимыми пояснениями. Справа панель управления. На ней приборы, контролируемые температуру активной зоны, скорость охладителя, мощность реактора, его реактивность, кнопка аварийной остановки "S" и график изменения потока нейтронов во времени. Управление – подъем, опускание регулирующих стержней, изменение скорости охладителя осуществляется клавишами со стрелками. Компьютер предупредит тревожным сообщением, если температура активной зоны близка к критической.

Управляя процессом, можно убедиться в связи мощности реактора и интенсивности теплоотвода, в наличии саморегулировки из-за зависимости параметров деления от температуры активной зоны.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ.

1. Что понимаем под термином ядерная цепная реакция?
2. Условия её возникновения?
3. Что понимаем под медленными нейтронами, быстрыми нейтронами?
4. Что имеется в виду, когда говорят о реакциях радиационного захвата?
5. Какие изотопы могут быть использованы в качестве ядерного топлива?
6. Что понимается под коэффициентом разложения нейтронов?
7. Объясните, что такое надкритическая масса, критическая масса подкритическая масса?
8. В чем разница между замедлителем и теплоносителем?
9. Перечислите виды реакторов:
10. по типу эксплуатации
11. по способу использования ядерного горючего?
12. Почему в активной зоне реактора обязательно наличие графита или тяжелой воды?
13. Как объяснить, что продукты горения испускают электроны, а позитроны нет?
14. Какую роль играют нейтроны при делении ядер?
15. Почему при малой скорости теплоносителя не вывести реактор на большую мощность?
16. Какой процесс в активной зоне с участием нейтронов – главный конкурент делению?
17. Почему защита активной зоны реактора должна эффективно поглощать гамма-излучение?
18. Как в реакторе создать условия для подъема мощности?
19. Оцените энергию, которая получается при делении 1 кг урана, если при делении одного ядра выделяется примерно 200 МэВ. Какое количество воды можно довести до кипения этим количеством тепла?

В отчете по работе привести принципиальную схему реактора, перечень обязательных элементов с пояснением их назначения и ответы на все вопросы, перечисленные выше.

0

4,

2

4,

2



( ) ) ,

0 1 . 0 .			
. . . . . ) ) 0 1 2. -			
34	6 67	8 . ::::: :	8 ; :::::

, . - 2 .

, . 2 . - 2 . 1

, . .

4, . 2. 1

. .. 2. 1

, - 2 . 1. 1

, . 2 . - 2 . 1

, . .

**9**

4, 2

, . 1

, . .

8 . 2 . . . 2

. 9 . - 2

**2 7 8 7 9 , 69 57 8 . 9**

**688 86**

8 20 5 0 . -

. . . . .

. . . . .

8 4 . 0 .

0 .

**200**

8 . 3 0





( ) ) ,

0 1 . 0 .			
. . . . . ) ) 0 1 2. -			
34	5 67	8 9 .	8

6	5 5 5	45 2 3	8 34
	. 0 9 5		
7	8 0 9 5 1	45 2	8 34
	. 9 5	5 3 7	
0 5 . 5 5			
		45 2	8 34
		5 3	
4		45 2	8 34
		5 3	
44	9	45 2	8 34
		5 3	
1			
1			
4	3 .	45 2	8 34
		5 3	
4		45 2	8 34
		5	
46	9 . . 3	45 2	8 34
		5	
47		45 2	8 34
		54 34 7	
4	9	45 2	8 34
		54 434	
		45 2	8 34
		54 34	
4 8			
		45 2	8 34
		54 734	
	9	45 2	8 34
		54 434	
	2 . .	45 2	8 34
		54 34 4	
	9 - 0 . .	45 2	8 34
		54 34	
54 2			
		54 63 5	8 34
		45 2	
		54	
	9 . .	54 2	8 34
		5 3 5	
		45 2	
		54	

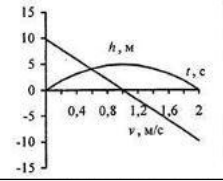




( ) \* ( ) ,

0 1 . 0 .			
/ / - / - / 0 1 2. -			
/ . ) + )			
+ / 34	564 67	8 9 / . ::::: :	8 ; < :::::

<	/		3
4	2 / 3 5 12	> 4 26 / 44 /	8 34
=	1 3 -> 2 / 58 - / 3 = > 2 = 5	3 3 > 3R	8 34
	/ . / . / 3 > 24 / 5 S3 T3 32 > 24 / = V 4 / = V 9 . / / 5	3 4 = V > 2 / =	8 34
	/ 2 / 3 > 2 2 . / / 5 8 ? / . 3 / -w / / 3 / / 3	42 = / -w 442 / =	8 34
?	5+ / 2 / 3 / / -4 47 / - = / 5 . 9 / /	>	8 34
	/ / , 4 / 5 2 > 24 , J 5 52 3 / / / / 2 / 3 / . = ? / . , / / 4 / / 5	, 5 42 6 , 5 ? >	8 34
6	/ / / , 4 = , = 4 / 5 2 / 2 3 = 5 / . 5	2 = 6 / = 4	8 34
7	= ? / 3 / -> 4 ? / 5 2 . 0 2 . 9 / / 3 4 . 5 / , > 2 = 5	2 = 2 2 . 2	8 34
	/ => / 2 / / 0 3	3 424	8 34





( ) \* ) ,

0 1 . 0 .			
/ / - / 0 1 2. -			
/ . ) )			
/ 4	5 = 7	8 / . ::::: :::::	8 ; :::::

..	/		/ / . 0
	C 24 / =2 / 2 0	2 2 =	□□□□□□
	/ , 2 5 4/5		
	/ 3 2 5 / / . 5		

8 0 . / / 2 . / / 1  
 ( - 0 , . 5 / / / /  
 2 5 0 / . - / /  
 8 / . 5 / . / / 5 / . / 5 /  
 . / . / 5 / . / 5 5  
 8 4 / 5 . / 0 .  
 0 / . / 5 / 0 .  
 2 0 8 / / . / 0 /  
 / 2 / . . 2 / / 5 /  
 2 2 5; 5 . 2 / 2 / . /  
 . . . / 2 / / 2 / /  
 . 2 / / / 5 /  
 / 1 . /  
 / 2 / ( 2 /  
 , . / 2 /  
 ©□ ) )



( ) ) ,

0 1 . 0 .			
. . . . . ) ) 0 1 2. -			
34	56 67	8 9 .	8 ;

2 2 . 3  
 2 . 3  
 1 . 2 . 3  
 9 5 . .  
 1. 2 3  
 2 . . 3  
 2- . 2  
 - . 2 .  
 5



4	3 3 .	54 2 5 4 3 5 45 2 5 4 7 3 4	8 34
	.	45 2 5 4 3 4 7	8 34
	0	54 2 5 3 5 45 2 5 4 3 4 7	8 34
		54 2 5 3	8 34
	9	54 2 5 6 3 6 2 5 7 3 7	8 34
	0	45 2 5 6 3	8 34
6		54 2 5 7 3	8 34
7	2	54 2 5 3	8 34
	2.	45 2 5 4 6 7	8 34
4	2. 0 9	45 2 5 4 6	8 34
44	8 . 3	45 2 5 4 6	8 34
4	1	45 2 5 4 7	8 34




( ) ) ,

0 1 . 0 .			
. . . . . ) ) 0 1 2. -			
34	56 67	8 9 .	8

4	. . - 0	454 2 547	8 34
4	8 9 1	454 2 54	8 34
4	. 0 9 1	454 2 54	8 34
4	.	454 2 54	8 34
46	-	454 2 54	8 34
47	.	454 2 54	8 34
4		454 2 5 4	8 34
	- 0 .	454 2 5 4	8 34
4		454 2 5 44	8 34
	1 1 0	454 2 5 44	8 34
	- 0	45 2 5 7 3 7	8 34
	.	454 2 5 4	8 34
	.	45 2 5 3	8 34
		45 2 5 663 74	8 34
6		454 2 5 4	8 34
7		454 2 5	8 34
	.	454 2 5	8 34
	2 . -	45 2 5	8 34
4	9 9 9 -	45 2 5 3	8 34
		45 2 5	8 34
	.	45 2	8 34



			
<p style="text-align: center;">" ( ) + ) ,</p>			
<p style="text-align: center;">0 1 . 0 .</p>			
<p style="text-align: center;">/ / " - / - / 0 1 2. -</p>			
<p style="text-align: center;">/ . ) + )</p>			
+ " / 34	56C 67	8 9 / . " :::::::::::	8 ; :::::

	<p>b2 / . "/</p> <p>" ? / 58 .</p> <p>= 5</p> <p>b . / C U</p>	<p>427 +</p> <p>9</p>	
?	<p>1 "/ / / .</p> <p>/ 2 / r / / 5</p> <p>= 1</p>	<p>4 = 5+</p> <p>2 . 3</p> <p>9 3</p>	8 34
C	<p>+ - / " 9</p> <p>/ . n4 ?7 / 5</p> <p>= / . 2 .</p> <p>/ 4= + .</p> <p>? 345 9- - 0 . " - / B / . 3</p>	<p>4 = U</p> <p>/ . 3</p> <p>. "3</p> <p>2 B / . 3</p> <p>4 3</p>	8 34
6	<p>2 . " 1. "</p> <p>" " .</p> <p>" 4/5 . 1 3</p> <p>? / 5</p>	<p>4 24 //</p> <p>= 42 //</p> <p>42= //</p> <p>42 4 //</p> <p>? 427 //</p>	8 34
7	<p>1 3 . " =7 = . 1 3 .</p>	<p>=c 76 n</p>	8 34
	<p>. " / .</p> <p>- 5 ? // 2. /</p>	<p>3</p> <p>3</p> <p>2? ( =</p> <p>a =,</p>	8 34

2

/ .	8 /	0 "				
0	" . 0 .					
8 3 4	'	. " " 3	.	.	.	. " "/ 2
	/	A A	. " "/ 2	. " "/ 2	. " "/ 2	/ / 2
	3	/ 1	/ / 2	/ / 2	/ / 2	
	3	" " - / 3	/ / 2	/ / 2	/ / 2	- /
	/		.	.	.	2
3	/	/	/	/	"	
3	" 5+	"	- /	/		. /
3	" .		- /	.	" "/	/ "
3	/ /			- /		/
" 5						. " "/
						- /



( ) ) ,

<p style="text-align: center;">1</p>			
/		7	8 /.
			8 ;

<p>1.</p> <p>1</p> <p>/</p> <p>/</p> <p>/</p> <p>/</p> <p>/</p> <p>/</p>	<p>.</p> <p>.</p> <p>.</p> <p>1</p>	<p>.</p> <p>.</p> <p>.</p> <p>1</p>	<p>.</p> <p>.</p> <p>.</p> <p>.</p> <p>.</p> <p>.</p>	<p>/</p> <p>/</p> <p>/</p> <p>/</p> <p>/</p> <p>/</p>
<p>1</p> <p>1</p> <p>1</p> <p>1</p>	<p>.</p> <p>.</p> <p>.</p> <p>1</p>	<p>.</p> <p>.</p> <p>.</p> <p>1</p>	<p>.</p> <p>.</p> <p>.</p> <p>.</p> <p>.</p> <p>.</p>	<p>/</p> <p>/</p> <p>/</p> <p>/</p> <p>/</p> <p>/</p>

22

8	- /	/
---	-----	---



( ) ) ,

1 . . . . .		
7 7		8 .
		8

	.	
	( . )	
8	( . )	

	.	
8	( . )	
	( . )	
8	( . )	