

УДК 621.45.04

В.Г. Ивановский, В.Г. Северин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА ОПЕРЕЖЕНИЯ
ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА В ЦИЛИНДР ДИЗЕЛЯ**

В статье рассмотрено исследование влияния угла опережения впрыска топлива на параметры рабочего процесса дизеля в условиях отличающихся от номинальных.

Ключевые слова: *угол опережения, топливоподача, процесс впрыскивания.*

У статті розглянуто дослідження впливу кута випередження впорскування палива на параметри робочого процесу дизеля в умовах, які відрізняються від номінальних.

Ключові слова: *кут випередження, паливоподача, процес впорскування.*

The article considers the study of influence of the angle fuel injection timing parameters for the workflow in terms of diesel differs from the nominal.

Keywords: *fuel injection timing, fuel injection, the process of injection.*

Постановка проблемы в общем виде. Полученные результаты экспериментального исследования дают возможность рационального выбора геометрического угла опережения подачи топлива топливным насосом высокого давления.

Материал данной статьи связан с экспериментальным и теоретическим исследованием рабочего процесса дизеля.

Анализ публикаций. В области исследования топливной аппаратуры дизелей, имеется достаточно научных публикаций, где рассматриваются основные направления совершенствования топливной аппаратуры [1-2].

Цель данной статьи обобщение полученных результатов исследования, а также анализа полученных результатов.

Изложение основного материала исследования с обоснованием полученных научных результатов. Пассажирские суда типа "Dolphin" в основном эксплуатируются при скоростях не более 18 уз., что связано с расписанием движения судов между портами. В результате нагрузка главных двигателей по мощности, как правило, не превышает 70 % от номинального значения. На данных режимах эксплуатации значительно снижаются параметры рабочего процесса дизеля. Так, например, максимальное давление сгорания p_z не превышает 8,2 МПа (при но-

минальном значении, равном 9,2 МПа). На некоторых режимах угол начала сгорания топлива $\varphi_{с2}$ находится за ВМТ. В результате понижается экономичность двигателей на основных режимах эксплуатации.

Угол опережения впрыскивания топлива в цилиндр дизеля является одним из основных параметров, который определяет экономичность дизеля и его механическую нагрузку. Обычно в инструкции по эксплуатации задается геометрический угол опережения подачи топлива ТНВД φ_{on}^2 . Оптимальное значение φ_{on}^2 подбирается в процессе доводки дизеля, устанавливается для номинального режима эксплуатации и ограничивается предельно допустимым значением максимального давления сгорания p_z . Со снижением нагрузки дизеля происходит уменьшение давления p_z и величина φ_{on}^2 может быть увеличена.

При большем значении φ_{on}^2 возрастает давление p_z и степень повышения давления λ , уменьшается догорание топлива на линии расширения, а следовательно, повышается экономичность дизеля на нагрузках, ниже номинальных.

В последние годы данному вопросу уделяется серьезное внимание отечественными исследователями [1], а также зарубежными дизель-строительными фирмами [2].

Конкретное решение данной задачи требует проведения глубокого теоретического и экспериментального исследования рабочего процесса дизеля, которое было выполнено в процессе эксплуатации дизелей 18РС 2.2V-400 на м/в «Dolphin».

В процессе экспериментального исследования изменение геометрического угла опережения подачи топлива ТНВД φ_{on}^2 производилось путем изменения положения верхней кромки плунжера по отношению отсечного-всасывающего окна втулки плунжера. Для этой цели в конструкции толкателя ТНВД предусматривается специальный регулировочный болт. Угол опережения φ_{on}^2 с достаточной точностью (до 0,1 °ПКВ) контролировался при помощи специального штатного приспособления. Кулачные шайбы привода ТНВД установлены на распределительном валу при помощи шпоночного соединения.

Эксперимент производился при значениях угла φ_{on}^2 , равных 10,3; 12; 13; 14,7; 16,7 °ПКВ до ВМТ и частоте вращения коленчатого вала n , равной 480 и 380 мин⁻¹. Скорость судна v изменялась от 12,6 до 19,1 узла, что соответствует основным эксплуатационным режимам. Для обеспечения одинаковых условий топливоподачи на разных режимах работы

дизеля при одинаковых углах φ'_{on} положение топливной рейки ТНВД m' цилиндра № 9 строго фиксировалось с помощью специального приспособления. Значения m' приведены в табл.1 и они равны расстоянию в миллиметрах от корпуса ТНВД до ограничительной шайбы топливной рейки. Меньшее значение m' соответствует большей цикловой подаче топлива. Однако при разных φ^2_{on} строго установить одинаковые режимы работы дизеля не представляется возможным. Так, например, с изменением угла опережения подачи происходило некоторое изменение активного хода плунжера и его скорости движения.

Результаты экспериментального исследования, представленные в табл.1, позволяют установить влияние угла φ^2_{on} на основные показатели рабочего процесса дизеля и в конечном итоге на его механическую напряженность, которая оценивается изменением следующих параметров: максимального давления сгорания p_z , степени повышения давления $\lambda' = p_z/p'_c$ и средней скоростью нарастания давления газов $\Delta p/\Delta \varphi$.

С увеличением геометрического угла опережения подачи топлива ТНВД φ^2_{on} происходит возрастание действительного угла опережения подачи топлива в цилиндр дизеля φ^{δ}_{on} , который определяется при осциллографировании по моменту начала подъема иглы форсунки.

Значение φ^{δ}_{on} меньше φ^2_{on} и на изменение φ^{δ}_{on} оказывают влияние сложные гидродинамические процессы, происходящие в системе высокого давления топлива. Однако в данном типе ТНВД, имеющем смешанное регулирование количества подаваемого топлива при малых цикловых подачах, со снижением нагрузки дизеля значение φ^{δ}_{on} , как правило, уменьшается.

Период задержки воспламенения топлива τ_i в основном зависит от температуры и давления воздуха в цилиндре в момент начала впрыска топлива, а поэтому, как видно из экспериментальных данных, приведенных в табл.1, с возрастанием φ^{δ}_{on} и снижением n , а следовательно, с уменьшением давления сжатия воздуха в момент начала впрыска топлива значение τ_i увеличивается.

Таблиця 1

Изменение параметров дизеля при разных фазах топливной подачи

Номер режима	Частота вращения коленчатого вала двигателя	Скорость суцільної подачі палива	Компресійний кут опереження до ВМТ	ТНВД	Положення рейки ТНВД	Максимальне давлення палива в ТНВД	Максимальне давлення палива в ТНВД	Угол опереження до ВМТ	Угол опереження випускного клапана	Продовження ності випускного клапана	Циркуляція сировини	Менша товщина	Угол опереження початку створення	Давлення світла в момент початку створення	Максимальне давлення створення	Стення повільного давлення	Середня швидкість нагрівання газів	Температура випускних газів
1	480	19,0	13	48,9	56,0	10,1	27,8	2,3	3,6	6,04	8,20	1,36	1,48	430				
2	480	17,8	13	54,8	63,5	10,96	25,75	2,64	3,3	5,97	7,83	1,31	1,3	390				
3	480	17,0	13	57,8	61,0	9,2	21,4	2,43	2,25	5,54	7,53	1,36	1,68	365				
4	480	16,05	13	62,1	57,0	8,0	14,5	8	0	4,90	7,27	1,33	2,07	335				
6	380	16,1	13	56,1	48,0	9,7	18,85	2,8	3,54	5,11	7,70	1,5	1,83	370				
6	380	14,4	13	62,5	42,5	8,4	13,3	7,5	0,885	4,81	7,43	1,5	2,7	295				
13	480	19,0	10,3	48,9	62,0	7,73	26,7	2,77	0	6,16	7,70	1,25	1,23	445				
14	480	18,1	10,3	54,8	65,0	6,78	23,1	2,45	0	6,00	7,43	1,26	1,26	397				
15	480	17,2	10,3	57,8	64,0	7,2	22,75	2,6	0	5,30	7,17	1,3	1,58	370				
16	480	16,4	10,3	62,2	57,0	6,5	13,8	2,7	-1,12	5,63	7,27	1,29	2,9	337				
17	380	16,6	10,3	56,1	51,0	7,1	20,5	3,2	0	5,40	7,37	1,35	1,88	372				
18	380	14,0	10,3	62,6	43,0	5,87	13,0	3,3	-1,75	4,95	7,43	1,5	4,05	322				
19	480	19,0	14,7	48,9	67,5	13,1	28,4	2,6	5,68	6,10	8,60	1,4	1,69	430				
20	480	18,0	14,7	54,9	64,0	12,2	24,4	2,70	4,45	5,58	8,00	1,43	1,80	410				
21	480	17,6	14,7	57,8	57,0	11,4	22,8	2,45	4,56	5,42	7,67	1,41	1,88	370				
22	480	16,0	14,7	62,2	52,0	10,2	15,9	2,6	2,27	5,18	7,43	1,43	2,1	332				
23	380	16,2	14,7	56,2	46,0	11,36	19,66	3,43	3,93	5,00	7,93	1,59	1,97	376				
24	380	14,0	14,7	62,6	40,0	10,4	14,3	3,65	2,17	4,83	7,60	1,57	2,89	300				
25	480	19,1	16,7	48,9	67,0	13,6	28,35	2,4	6,8	5,72	8,93	1,56	1,95	430				
26	480	18,0	16,7	54,8	61,0	13,6	24,9	2,4	6,78	5,30	8,23	1,55	1,8	412				
27	480	17,2	16,7	57,8	57,0	14,5	23,4	3,12	5,8	5,20	7,90	1,52	1,8	385				
28	480	16,4	16,7	62,1	49,0	11,3	15,2	2,85	3,4	5,34	7,83	1,47	2,45	339				
29	380	16,3	16,7	56,2	44,0	13,0	18,9	3,1	6,3	4,53	8,27	1,82	2,3	389				
30	380	12,6	16,7	62,6	36,0	11,44	14,1	3,3	3,96	4,73	7,87	1,66	2,97	318				
31	480	19,0	12,0	48,9	71,5	9,2	27,6	2,42	2,3	6,42	8,23	1,28	1,5	435				
32	480	18,0	12,0	54,8	63,0	9,5	24,6	2,5	2,46	5,82	7,70	1,32	1,46	399				
33	480	17,1	12,0	57,8	57,5	8,8	23,1	2,66	1,1	5,56	7,33	1,31	1,46	380				
34	480	15,8	12,0	62,1	47,5	7,84	17,9	3,0	-0,784	5,40	7,23	1,34	2,72	340				
35	380	16,2	12,0	56,1	48,0	9,1	20,0	2,7	3	4,66	7,33	1,57	1,66	395				
36	380	13,8	12,0	62,5	41,0	7,0	12,7	3,13	0	4,96	7,23	1,48	3,0	310				

Угол начала сгорания топлива $\varphi_{сз}$ зависит от угла опережения подачи топлива $\varphi_{он}^{\delta}$ и от периода задержки воспламенения τ_i . В свою очередь, величина $\varphi_{сз}$ определяет значение давления сжатия воздуха в момент начала сгорания p'_c , максимальное давление p_z , а следовательно, и степень повышения давления $\lambda' = p_z/p'_c$.

Средняя скорость нарастания давления $\Delta p/\Delta \varphi$ зависит от угла опережения $\varphi_{сз}$, а также от периода задержки воспламенения τ_i . При одинаковой частоте вращения и законе подачи топлива с возрастанием времени τ_i увеличивается количество топлива, впрыснутого в цилиндр к моменту начала воспламенения. В результате начальная фаза сгорания топлива ("фаза быстрого сгорания") протекает более интенсивно, так как в этой фазе сгорает большая часть топлива, впрыснутого за время τ_i .

Таким образом, изменение геометрического угла опережения подачи топлива ТНВД $\varphi_{он}^{\delta}$ оказывает существенное влияние на протекание рабочего процесса дизеля.

С увеличением угла $\varphi_{он}^{\delta}$ возрастает экономичность дизеля, однако одновременно растет механическая напряженность, которая косвенно характеризуется значениями p_z , λ' и $\Delta p/\Delta \varphi$.

Результаты экспериментального исследования, приведенные в табл.1, дают возможность произвести выбор рационального геометрического угла опережения подачи топлива ТНВД $\varphi_{он}^{\delta}$ равным не более 16,7 °ПКВ до ВМТ. Как видно из экспериментальных данных, приведенных в табл.1, при $\varphi_{он}^{\delta} = 16,7$ °ПКВ (режимы от 25 до 30) максимальное давление p_z не превышает предельно допустимого (номинального) значения 9,2 МПа. Степень повышения давления λ' не превышает 2,0, а средняя скорость нарастания давления $\Delta p/\Delta \varphi$ меньше 0,4 МПа на 1 °ПКВ, что вполне допустимо для высокофорсированного среднеоборотного дизеля. Если сравнить полученные значения $\Delta p/\Delta \varphi$ при увеличенном значении $\varphi_{он}^{\delta} = 16,7$ °ПКВ (режимы от 25 до 30) и при номинальном угле $\varphi_{он}^{\delta} = 12$ °ПКВ (режимы от 31 до 36), то видно, что динамическая

механическая напряженность дизеля увеличилась незначительно и может быть допущена в процессе длительной эксплуатации.

На рис.1 представлены осциллограммы рабочего процесса дизеля и топливоподачи при $\varphi_{on}^2 = 12$ °ПКВ и 16,7 °ПКВ.

В процессе экспериментального исследования не представляется возможным количественно определить повышение экономичности дизеля при увеличении φ_{on}^2 , так как практически невозможно провести эксперимент в одинаковых условиях. Кроме того, определение расхода топлива на судне осуществляется штатным расходомером фирмы "Сеффле" (Швеция) с погрешностью до 2 %, что соизмеримо с ожидаемой величиной повышения экономичности.

Для ориентировочной оценки повышения экономичности дизеля при увеличении максимального давления сгорания p_z (увеличения геометрического угла опережения подачи ТНВД φ_{on}^2) было проведено теоретическое исследование рабочего процесса дизеля. Результаты теоретического исследования приведены в табл.2 и на рис.2. Исследование проведено при различной частоте вращения и мощности дизеля, которые соответствуют основным эксплуатационным режимам.

На всех исследованных режимах при изменении p_z от 7 до 9 МПа значение степени повышения давления λ не превышало 2,18, при этом среднее значение индикаторного КПД η_i возрастало приблизительно на 1,6 %. Если использовать полученные теоретические зависимости $\eta_i = f(p_z)$ (см. рис.3) для оценки повышения экономичности дизеля с увеличением φ_{on}^2 от 12 °ПКВ до 16,7 °ПКВ, то при реальном изменении величины p_z (см.табл.1) увеличение η_i оценивается приблизительно на 0,6 %.

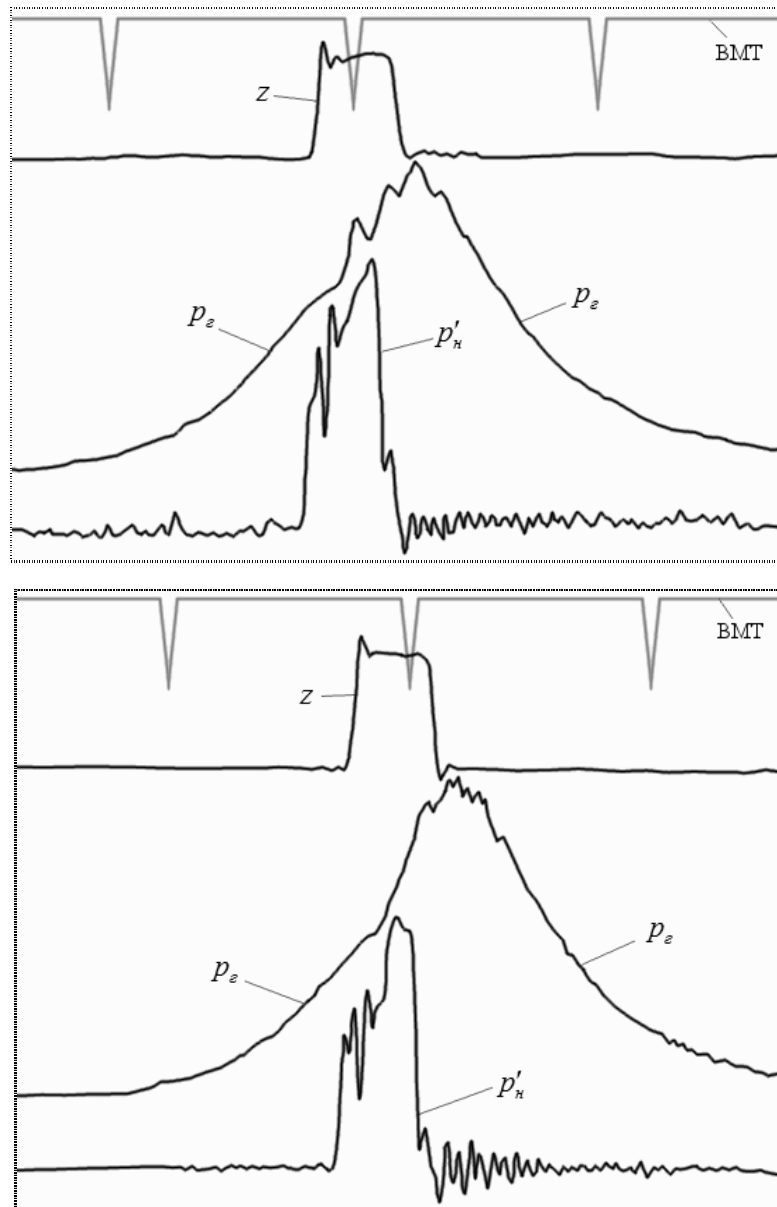


Рис 1. Влияние геометрического угла опережения подачи топлива

φ_{on}^z на рабочий процесс дизеля и топливоподачу
($V = 16,2$ узла, $n = 380$ мин⁻¹)

а) угол опережения $\varphi_{on}^z = 12$ °ПКВ до ВМТ

б) угол опережения $\varphi_{on}^z = 16,7$ °ПКВ до ВМТ

Таблиця 2

Результаты теоретического исследования рабочего процесса дизеля

Номер расчета	Мощность двигателя, N_e , кВт	Частота вращения двигателя, n , мин ⁻¹	Максимальное давление сгорания, p_z , МПа	Степень повышения давления, λ	Индикатор КПД, η_i
1	5281	480	7,0	1,18	0,446
2	5281	480	7,5	1,27	0,453
3	5281	480	8,0	1,35	0,459
4	5281	480	8,5	1,43	0,463
5	5281	480	9,0	1,52	0,468
6	4851	480	7,0	1,31	0,456
7	4851	480	7,5	1,4	0,462
8	4851	480	8,0	1,5	0,467
9	4851	480	8,5	1,59	0,471
10	4851	480	9,0	1,68	0,474
11	4541	480	7,0	1,41	0,462
12	4541	480	7,5	1,51	0,467
13	4541	480	8,0	1,61	0,471
14	4541	480	8,5	1,71	0,475
15	4541	480	9,0	1,81	0,478
16	3408	380	7,0	1,51	0,467
17	3408	380	7,5	1,62	0,472
18	3408	380	8,0	1,72	0,475
19	3408	380	8,5	1,83	0,478
20	3408	380	9,0	1,94	0,481
21	3071	380	7,0	1,69	0,474
22	3071	380	7,5	1,82	0,478
23	3071	380	8,0	1,94	0,481
24	3071	380	8,5	2,06	0,483
25	3071	380	9,0	2,18	0,484

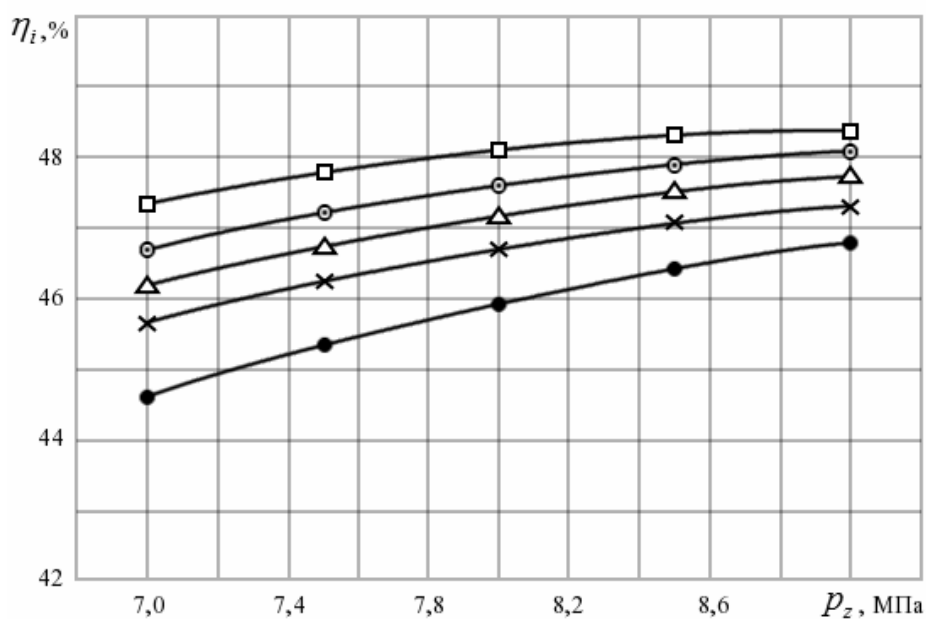


Рис. 2. Влияние максимального давления p_z на индикаторный КПД дизеля «Пилстик» 18РС-2V

η_i – индикаторный КПД

p_z – максимальное давление сгорания

—●— – $Ne = 5281$ кВт, $n = 480$ мин⁻¹;

—×— – $Ne = 4851$ кВт, $n = 480$ мин⁻¹;

—△— – $Ne = 4541$ кВт, $n = 480$ мин⁻¹;

—○— – $Ne = 3408$ кВт, $n = 380$ мин⁻¹;

—□— – $Ne = 3071$ кВт, $n = 380$ мин⁻¹.

Выводы. Результаты исследования позволяют установить влияние угла опережения впрыска топлива на основные показатели рабочего процесса дизеля и на его механическую напряженность.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Фомин Ю.Я. *Топливная аппаратура судовых дизелей: Справочник* / Ю.Я. Фомин, Г.В. Никонов, В.Г. Ивановский. – М.: Машиностроение, 1982. – 168 с.
2. Фомин Ю.Я. *Гидравлический расчет топливных систем судовых дизелей с разветвленными нагнетательными трубопроводами: Справочник* / Ю.Я.Фомин. – М.: Машиностроение. – № 11. – 1964. – 65 с.

Стаття надійшла до редакції 23.09.2014

Рецензенти:

кандидат технічних наук, доцент кафедри «Суднові енергетичні установки» Одеської національної морської академії **І.І. Черниш**

кандидат технічних наук, професор кафедри «Судноремонт» Одеського національного морського університету **В.В. Груздєв**