

ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА НАДЕЖНОСТЬ ПУСКА
ГЛАВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Во время маневров судна надёжность пуска главного судового двигателя в существенной степени определяет безопасность мореплавания. Неудавшийся пуск может привести к серьёзным аварийным последствиям. Поэтому количественная оценка факторов, влияющих на пуск дизеля, может определить пути повышения безопасности маневровых режимов судов.

При пуске частота вращения двигателя, в общих чертах, изменяется как показано на рис. 1. При достижении некоторой пусковой частоты ω_s происходит переход двигателя на топливо и далее двигатель разгоняется под управлением регулятора частоты вращения. Частота затухает около уставки ω_x . Пуск двигателя будет тем надёжней, чем меньше будет заштрихованная площадь между кривой $\omega(t)$ и осью ординат. Иными словами – чем выше будет угловое ускорение в начале пуска. Расход воздуха на успешный запуск двигателя не должен ставить под сомнение успешность последующих пусков. Поэтому иногда лучше пожертвовать небольшой задержкой в достижении частоты ω_x в пользу экономии воздуха.

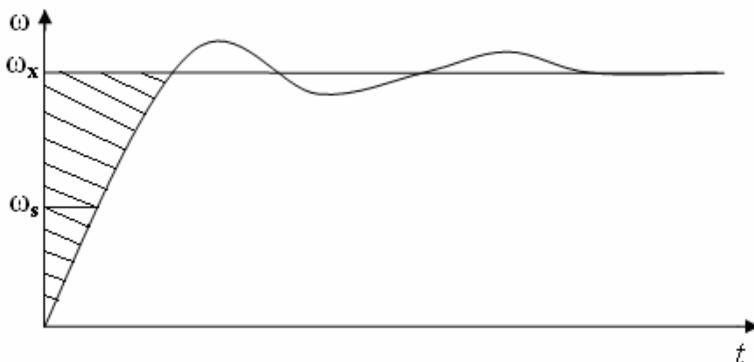


Рис. 1. Изменение частоты вращения кривошипа при пуске

В качестве объекта исследования выбран дизель 6ЧН25/34 Первомайского машиностроительного завода – среднеоборотный, четырёхтактный, нереверсивный тронковый с газотурбинным наддувом, про-

стого действия, с вертикальным однорядным расположением цилиндров. Количество цилиндров – 6, номинальная мощность – 331,2 кВт, номинальная частота вращения – 500 мин⁻¹, диаметр цилиндра – 0,25 м, ход поршня – 0,34 м. Согласно конструкторской документации воздух подаётся в цилиндр при угле ±4° относительно ВМТ.

Опыты показали, что частота вращения дизеля нарастает от нуля до максимального значения без провалов и значительных забросов: превышение частоты вращения, достигнутой в конце разгона, над установившейся частотой вращения составляет примерно 10 %. Первые 3 – 3,5 с частота вращения нарастает практически прямолинейно. Подача пускового воздуха прекращалась в такой момент, что энергии от возникших вспышек топлива в цилиндрах уже было достаточно для продолжения раскручивания кривошипа (рис. 2). Частота вращения в этой точке равна примерно 240 мин⁻¹. Перегиб на кривой изменения частоты вращения происходит в момент полного перевода двигателя на топливо. Была определена зависимость времени достижения установившейся частоты вращения от давления воздуха в баллонах (табл. 1).

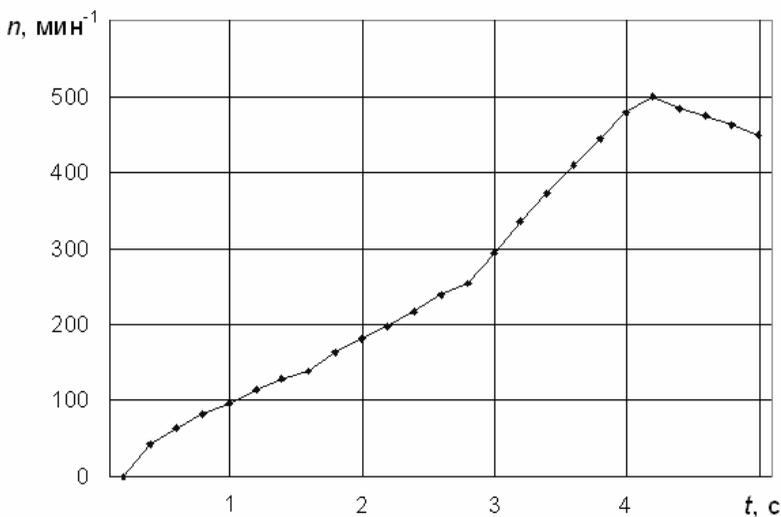


Рис. 2. Изменение частоты вращения кривошипа при пуске

При пуске судового дизеля происходит сложное взаимодействие между самим дизелем, регулятором частоты вращения и пусковой системой. Для анализа этого взаимодействия была разработана мате-

математическая модель, состоящая из нескольких модулей. Модель рабочих процессов дизеля состоит из модулей расчёта рабочих процессов в цилиндре, турбокомпрессоре, впускном и выпускном коллекторах. В основу моделирования этих процессов была положена методика, предложенная в [4]. Математический аппарат этой модели основан на термодинамических уравнениях, которые интегрируются на каждом шаге поворота кривошипа. Параметры газа рассчитываются в любом замкнутом объёме по трём уравнениям: первого закона термодинамики, массового баланса и состояния. Газы рассматриваются в виде смеси, состоящей из воздуха и "чистых продуктов сгорания". Движение кривошипа и ротора турбоагнетателя определялись по принципу Д'Аламбера. Функциональные зависимости работы пусковой системы также основаны на первом законе термодинамики, массового баланса и состояния. Движение частей регулятора частоты вращения описывалось с применением уравнения Лагранжа и уравнения Бернулли. Уравнения движения частей регулятора учитывали особенности его работы во время пуска двигателя.

Таблица 1

Влияние давления воздуха в баллонах на продолжительность пуска дизеля

Начальное давление пускового воздуха в баллонах (абсолютное), МПа	Время достижения установившейся частоты вращения, с
1,4 – 1,6	4,2 – 4,1
1,7 – 1,9	4,0 – 3,7
2,0 – 2,2	3,6 – 3,5

В работах [1 – 3 и 5 – 10] среди основных факторов, влияющих на процесс пуска судового дизеля, отмечены следующие: фазы работы пусковых клапанов, конструктивные особенности пусковых клапанов, момент перевода двигателя с воздуха на топливо.

При выборе фаз работы пусковых клапанов одним из главных условий является сохранение минимально необходимого количества одновременно открытых пусковых клапанов. То есть, иными словами, – углов перекрытия пусковых клапанов для цилиндров, работающих друг за другом. Соблюдение этого количества необходимо, чтобы двигатель пускался при любом положении кривошипа. В общем случае это зависит от числа цилиндров: для шестицилиндрового двигателя – один клапан, восьмицилиндрового – два и т.д.

При оценке влияния фаз работы пусковых клапанов прочие условия полагались равными. К таковым относятся: давление воздуха в

баллонах (1,5 МПа, соответствует 1 о.е.), начальное положение кривошипа первого цилиндра относительно ВМТ (5°), ограничение топливоподачи на время пуска (0,5 максимальной топливоподачи), пусковая частота вращения (240 мин^{-1}), установившаяся частота вращения (420 мин^{-1} , соответствует 1 о.е.).

Из рис. 3 видно, что кривые 1 – 4 мало отличаются друг от друга, а 2 и 3 – сливаются в одну линию. Характер изменения частоты вращения при пуске для рассмотренных случаев позволяет заключить, что наиболее интенсивно частота вращения кривошипа нарастает, если фаза открытия пускового клапана близка к ВМТ; поршень цилиндра, находящегося в пусковом положении, находится максимально близко к ВМТ; пусковой клапан остаётся открытым вплоть до открытия выпускного клапана (для данного двигателя 130° после ВМТ).

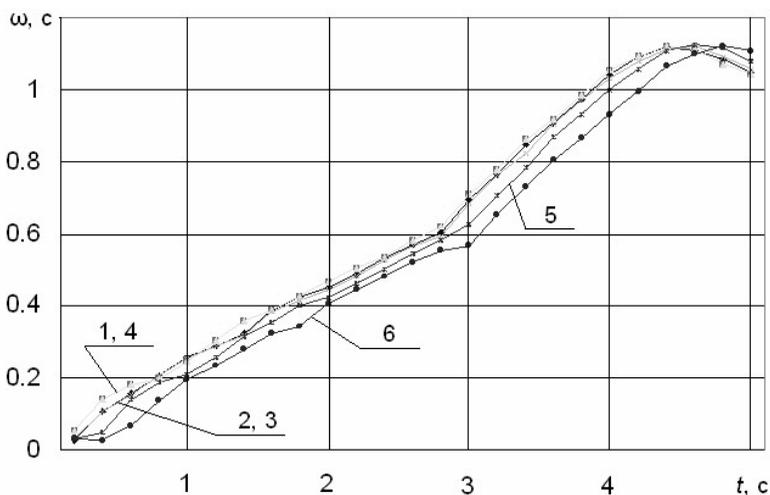


Рис. 3. Изменение частоты вращения кривошипа при пусках с разными значениями фаз работы пусковых клапанов:
 1 (—■—) – $0 \dots 120^\circ$; 2 (—◆—) – $0 \dots 130^\circ$; 3 (—×—) – $0 \dots 150^\circ$;
 4 (—▲—) – $10 \dots 130^\circ$; 5 (—■—) – $20 \dots 140^\circ$; 6 (—■—) – $30 \dots 150^\circ$

Чтобы определить какое влияние на пуск двигателя оказывает количество одновременно открытых пусковых клапанов, был промоделирован пуск дизеля при условии одновременного открытия двух пусковых клапанов. Фаза работы одного полагалась равной 180° .

Из рис. 4 видно, что существенной разницы в пусках с разным количеством одновременно открытых пусковых клапанов нет.

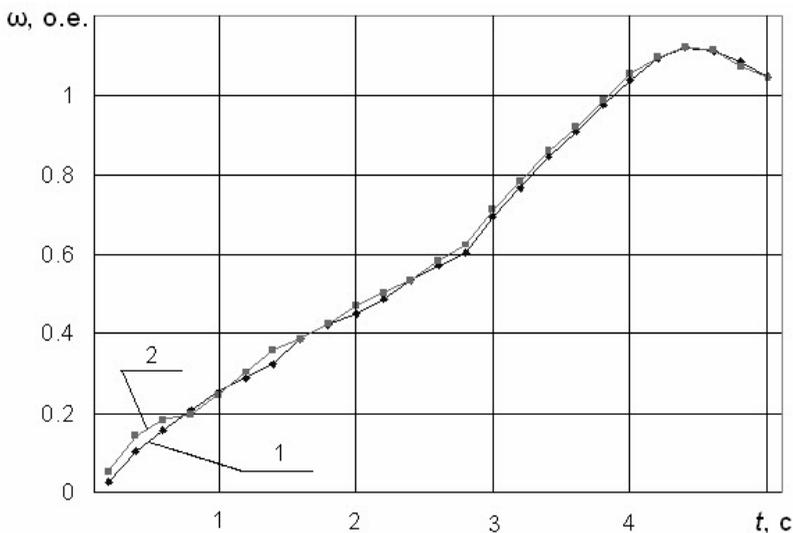


Рис. 4. Изменение частоты вращения кривошипа при пусках с разным количеством одновременно открытых пусковых клапанов:

1 — один клапан; 2 — два клапана

Для судовых дизелей используются два основных типа пусковых клапанов: простого и двойного действия. В первом случае у клапана есть одна полость управления (верхняя), во втором – две (верхняя и нижняя). Верхняя полость предназначена для открытия клапана, нижняя – для закрытия. У клапана простого действия закрытие происходит под действием возвратной пружины при одновременном стравливании в атмосферу воздуха из верхней полости управления. В работах [3, 5] сравнивается эффективность этих двух типов пусковых клапанов. Выявлена большая эффективность пусковых клапанов двойного действия на режиме реверсирования двигателя. Данный тип клапана не захлопывается при подаче контрвоздуха, вследствие чего дизель легко тормозится при выключении топлива и подаче в цилиндры контрвоздуха. Для оценки того, как на пуск влияют пусковые клапаны двойного действия, были промоделированы пуски для случаев применения обоих типов клапанов.

Сравнительные расчёты показали, что применение клапанов двойного действия не увеличивает скорость изменения частоты вращения и слабо влияет на расход воздуха (рис. 5). Однако велико влияние на фазы закрытия клапанов: они наступают значительно раньше, чем в случае применения клапанов простого действия (табл. 2).

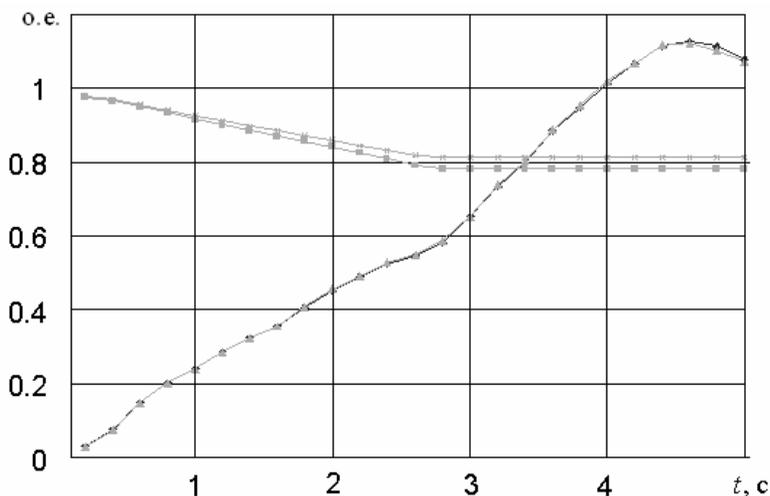


Рис. 5. Изменение частоты вращения кривошипа и расхода воздуха при пусках с пусковыми клапанами двойного и простого действия: \blacktriangle — частота вращения; \blacksquare — давление пускового воздуха (пусковые клапаны простого действия); \blacktriangle — частота вращения; \blacksquare — давление пускового воздуха (пусковые клапаны двойного действия)

Таблица 2

Фазы открытия пусковых клапанов

Открытие клапана	Фазы работы клапана простого действия, градусы		Фазы работы клапана двойного действия, градусы	
	цилиндр №1	цилиндр №3	цилиндр №1	цилиндр №3
первое	9 ... 290	12 ... 384	8 ... 151	1 ... 140
второе	22 ... 310	3 ... 307	20 ... 148	0 ... 134
третье	19 ... 243	—	11 ... 145	—

Момент перевода двигателя с воздуха на топливо формально можно определять по двум параметрам: по достижению некоторой частоты вращения, называемой пусковой, или по выдержке времени. Пусковая частота вращения, несомненно, является более информативной величиной, так как лучше отражает состояние пуска. Например, при "утяжелении" винта, пусковая частота достигается позже и соответственно позже можно начать подачу топлива в двигатель.

Пуск экспериментального двигателя был смоделирован при разных значениях частоты, при которой происходит полный переход на топливо.

Из рис. 6 видно, что более низкие значения пусковой частоты вращения позволяют существенно экономить пусковой воздух. Сам разгон при этом серьёзно не изменяется.

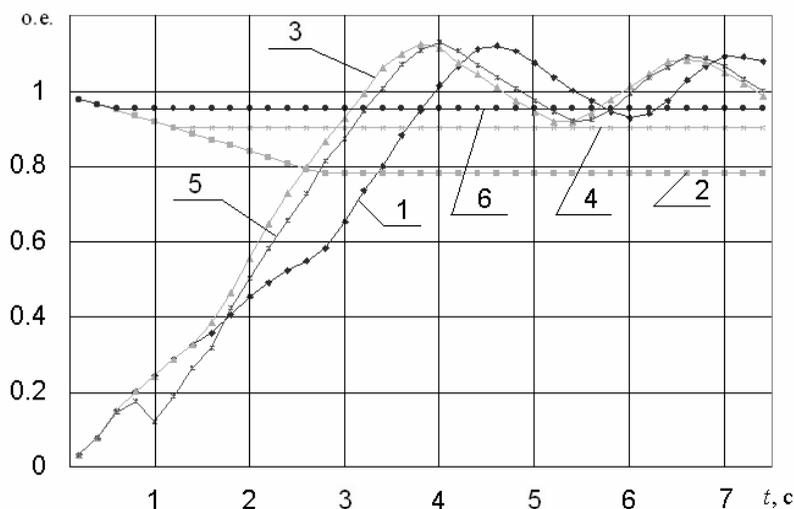


Рис. 6. Изменение частоты вращения кривошипа и расхода воздуха при пусках с различными значениями пусковой частоты вращения: 1 и 2 – частота вращения и расход воздуха при пусковой частоте 240 мин^{-1} ; 3 и 4 – частота вращения и расход воздуха при пусковой частоте 120 мин^{-1} ; 5 и 6 – частота вращения и расход воздуха при пусковой частоте 60 мин^{-1}

Анализ результатов проведенного исследования позволяет заключить, что на надёжность пуска главного судового дизеля влияют, главным образом, значение пусковой частоты вращения и пусковой подачи топлива. При этом для экономии пускового воздуха следует стремиться к уменьшению пусковой частоты вращения, но она должна быть достаточной для надёжного самовоспламенения топлива. Главным требованием для работы пневматической пусковой системы является равенство количества одновременно открытых пусковых клапанов минимально необходимому количеству цилиндров, которые должны быть в пусковом положении. Для ускорения разгона кривошипа при пуске открытие пускового клапана должно наступать как

можно ближе к ВМТ, закрытие – примерно одновременно с открытием выпускного клапана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гавриленко Л.Г. Анализ процессов в пусковой системе судового двигателя Дизеля: диссертация. – Одесса: ОИИМФ, 1948. – 142 с.

2. Гаврилов В.С. Контрвоздух и его эффективность при реверсировании судовых двигателей с прямой передачей на винт // Сборник трудов ЛОНТОВТ. – 1958. – Вып. VI. – С. 6 – 8.

3. Гаврилов В.С. Реверсивные качества и особенности эксплуатации реверсивно-пусковой системы двигателей СД72 // Бюллетень технико-экономической информации. – 1957. – №9. – С. 4 – 7.

4. Гончар Б.М. Численное моделирование рабочего процесса дизелей: дис. ... докт. техн. наук. – Л.: ЦНИДИ, 1969. – 280 с.

5. Зинченко В.И. Некоторые особенности рабочего процесса двигателя 5ДКРН 50/110 // Информационный сборник ЦНИИМФ, 1960. – №53. – С. 10 – 12.

6. Зинченко В.И. Результаты ходовых испытаний двигателя Бурмейстер и Вайн 5ДКРН 50/110 // Материалы Брянской научно-технической конференции по малооборотным высокомошным судовым дизелям. – Брянск, 1961. – С. 14 – 15.

7. Конаков А.Г. Динамика процесса разгона и подачи топлива при пуске судовых среднеоборотных дизелей: автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: ОИИМФ, 1985. – 18 с.

8. Меркт А.Р. Индикаторный процесс при работе судового дизеля на топливе в пусковом режиме: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: ОГМА, 1991. – 14 с.

9. Самсонов В.И. Исследование разгона на воздухе мощных судовых дизелей. – Автореф. дис. на соиск. учён. степ. канд. техн. наук. – Одесса: ОИИМФ, 1962. – 15 с.

10. Щелгачёв Р.В. Реверсивные системы судовых дизелей. – Л.: Судостроение, 1966. – 248 с.