

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ МАЛОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ СО СРЕДНИМ ИНДИКАТОРНЫМ ДАВЛЕНИЕМ 2,0 МПа

*В.В. Рогалев, к.т.н.; А.В. Клочков, асп.;
Брянский государственный технический университет
А.А. Обозов, к.т.н.; ЗАО УК «Брянский машиностроительный завод»*

Показатели рабочего процесса дизеля определяются законом тепловыделения в его цилиндрах. Представлены результаты исследования процесса тепловыделения $x = f(\varphi)$ в цилиндрах мощного судового малооборотного дизеля 6ДКРН 50/200-14 со средним индикаторным давлением 2,0 МПа на режимах винтовой характеристики. Показано, что экспериментальные кривые тепловыделения могут быть с большой точностью аппроксимированы зависимостью Вибе. Сопоставление процессов тепловыделения показало, что двукратное увеличение среднего индикаторного давления существенно изменило процесс тепловыделения в цилиндрах.

Важнейшие показатели рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания (удельный эффективный расход топлива, среднее эффективное давление, удельная мощность, токсичность отработавших газов) зависят от качества процесса сгорания топлива в цилиндрах, т. е. от закона тепловыделения. Кривая тепловыделения рассчитывается по полученным экспериментально индикаторным диаграммам и обычно представляется в виде полуэмпирических зависимостей Б.П. Пугачева, И.И. Вибе, Б.М. Гончара и др. Процессы тепловыделения в судовых дизелях со средним индикаторным давлением до

1,0 МПа были подробно исследованы и опубликованы в работах [1–4]. Непрерывное совершенствование конструкций мощных малооборотных судовых дизелей (МОД) позволило в настоящее время увеличить среднее индикаторное давление до величины 2,0 МПа (табл. 1).

Данные табл. 1 показывают, что среднее индикаторное давление в цилиндрах МОД с увеличением степени форсировки постоянно росло от величины около 1,0 МПа на дизелях ДКРН-3 и ДКРН-4 до значений вдвое больших на современных дизелях ДКРН-14 и ДКРН-15. Такие двигатели классифицируются как сверхдлинноходовые, имеют отношение диаметра цилиндра к ходу поршня $S/d \geq 4$, характеризуются значениями максимального давления цикла (15–17 МПа) и предельно высокими для одноступенчатых схем наддува давлениями продувочного воздуха (до 0,4 МПа).

Рабочий процесс высокофорсированного сверхдлинноходового дизеля значительно отличается от рабочего процесса наиболее распространенных судовых дизелей со средним индикаторным давлением p_i около 1,0 МПа и отношением $S/d \geq 2-2,5$.

Двигатель 6ДКРН 50/200-14, выпускаемый Брянским машиностроительным заводом по лицензии фирмы MAN-B&W Diesel A/S, на режиме спецификационной максимальной длительной

Таблица 1

Относительное время протекания процессов в двухтактных двигателях

Двигатель	Мощность двигателя P_e , кВт	Частота вращения n , об/мин	Максимальное давление цикла p_{Σ} , МПа	Давление наддува p_k , МПа	Среднее индикаторное давление p_i , МПа	Отношение S/d
9ДКРН 80/160-4	15 900	122	8,3	0,220	1,20	2,0
6ДКРН 45/120-7	4000	170	8,7	0,265	1,32	2,7
6ДКРН 60/195-10	9900	111	12,6	0,335	1,72	3,2
6ДКРН 42/136-11	5970	176	14,6	0,346	1,89	3,2
6ДКРН 26/98-12	2200	250	17,0	0,370	1,81	3,8
6ДКРН 60/229-13	12 268	105	14,1	0,355	1,91	3,8
6ДКРН 50/200-14	9480	127	15,1	0,362	2,03	4,0
7ДКРН 50/200-15	11 060	127	15,1	0,365	1,99	4,0

мощности (СМДМ) имеет следующие параметры: эффективная мощность 9480 кВт при частоте вращения коленчатого вала 127 об/мин; максимальное давление цикла 15,1 МПа; давление надувочного воздуха 0,362 МПа; среднее индикаторное давление 2,03 МПа.

Испытания двигателя проводились на стендах завода-изготовителя на режимах винтовой характеристики, соответствующих 110, 100, 90, 75 и 50 % СМДМ. На рис. 1 приведены экспериментальные индикаторные диаграммы, полученные с помощью комплекса испытательной аппаратуры PMI-System (MAN-B&W).

Важной конструктивной особенностью топливной аппаратуры дизеля 6ДКРН 50/200-14 является наличие VIT-системы, обеспечивающей неизменную величину максимального давления цикла в широком диапазоне эксплуатационных режимов работы двигателя. VIT-система, управляемая непосредственно электронным регулятором частоты вращения в диапазоне нагрузки от 90 % СМДМ до 110 % СМДМ, поддерживает уровень p_z постоянным (около 15,1 МПа), соответствующим номинальному режиму работы судовой энергетической установки (режиму 100 % СМДМ).

Обработка индикаторных диаграмм по методике ЦНИДИ [1] позволила получить на режимах винтовой характеристики законы тепловыделения $x = f(\varphi)$, представленные на рис. 2. Анализ полученных функций тепловыделения показывает, что их форма существенно зависит от режима работы двигателя и при снижении нагрузки угол наклона активного участка функции тепловыделения значительно увеличивается. Так, к моменту

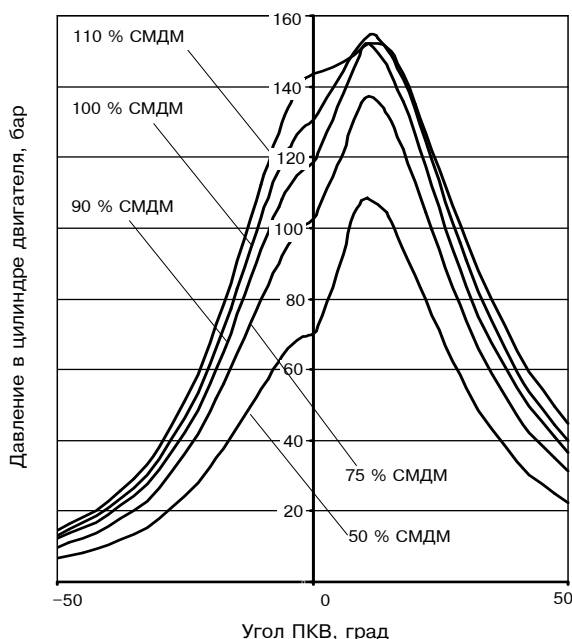


Рис. 1. Экспериментальные индикаторные диаграммы режимов работы дизеля 6ДКРН 50/200-14 по винтовой характеристике

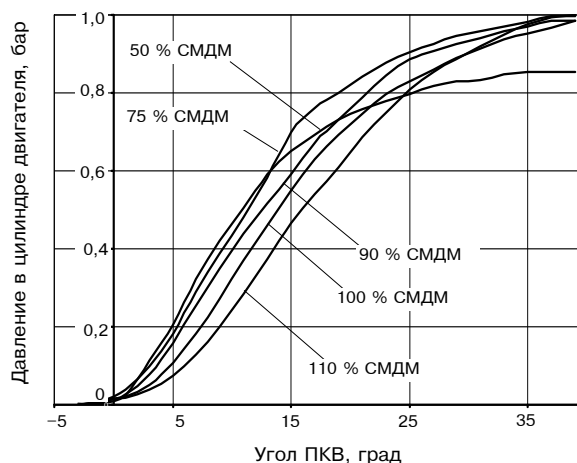


Рис. 2. Законы тепловыделения в цилиндрах дизеля 6ДКРН 50/200-14 на режимах винтовой характеристики

поворота коленчатого вала на угол 15° ПКВ на режиме 100 % СМДМ выделяется 55 % теплоты, введенной в цилиндр с цикловой подачей топлива, а на режиме 75 % СМДМ — 70 %. Таким образом, при исследованиях рабочего процесса необходимо учитывать изменение формы кривой тепловыделения как функции режима работы дизеля.

Экспериментально полученные характеристики тепловыделения были аппроксимированы функциями различного вида, однако наилучший результат был получен при их представлении с помощью формулы Виббе, имеющей вид

$$x(\varphi) = 1 - \exp\left\{-6,908 \left[(\varphi - \theta)\varphi_z^{-1}\right]^{m+1}\right\},$$

где $x(\varphi)$ — доля выделившейся теплоты; φ_z — условная продолжительность сгорания; φ — текущий угол поворота коленчатого вала; m — показатель характера сгорания; θ — угол начала тепловыделения.

В табл. 2 приведены значения коэффициентов m и φ_z , полученные при аппроксимации экспериментальных законов тепловыделения с использованием метода наименьших квадратов. Активное тепловыделение во всех опытах начиналось при углах 1–3° ПКВ до ВМТ.

Анализ полученных данных показывает, что процесс тепловыделения исследуемого дизеля является динамичным и имеет небольшую продолжительность. Для двигателей с $P_i \approx 1,0$ МПа характерны значения $m \approx 1,2$ и $\varphi_z \approx 70^\circ$ ПКВ [2–4]. При исследованиях дизеля 6ДКРН 50/200-14 на режиме спецификационной максимальной длительной мощности получены значения $m \approx 1,10$ и $\varphi_z \approx 52^\circ$ ПКВ, что подтверждает более динамичный характер тепловыделения в цилиндрах исследуемого дизеля. Функция тепловыделения имеет увеличенный угол наклона (так как сни-

**Аппроксимация экспериментальных кривых
тепловыделения дизеля 6ДКРН 50/200-14
зависимостью Вибе**

Режим работы	m	φ_z	θ
110 % СМДМ	1,105	52	-1
100 % СМДМ	1,100	52	-3
90 % СМДМ	1,060	48	-3
75 % СМДМ	1,050	44	-3

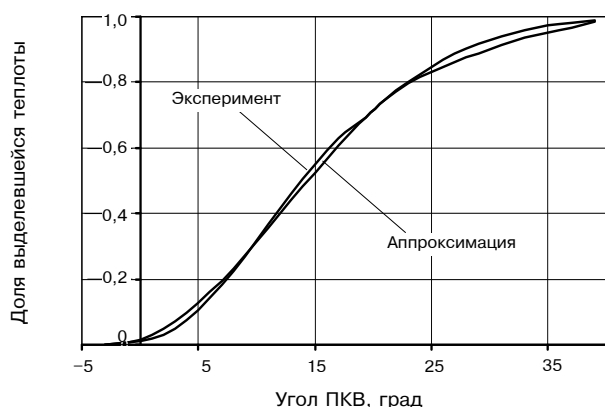


Рис. 3. Аппроксимация экспериментального закона тепловыделения формулой Вибе для режима работы 100% СМДМ

жается коэффициент m , т. е. изменяется тангенс угла наклона кривой тепловыделения на участке активного горения), и процесс сгорания завершается значительно быстрее, т. е. за 52° ПКВ, а не за 70° ПКВ, как это имеет место для двигателей с более низкими значениями среднего индикаторного давления.

В качестве примера на рис. 3 приведен результат аппроксимации экспериментального закона тепловыделения формулой Вибе для режима работы, соответствующего 100 % СМДМ исследуемого дизеля. Следует отметить, что процесс тепловыделения практически завершается (величина $x = f(\varphi)$ достигает значения 0,99) к моменту 40° ПКВ. Аппроксимирующая кривая хорошо совпадает с экспериментальной, что подтверждает пригодность формулы Вибе для адекватного описания процесса тепловыделения дизелей со средним индикаторным давлением около 2,0 МПа.

На рис. 4 представлено изменение скорости тепловыделения $dx/d\varphi = f(\varphi)$ на режиме 100 % СМДМ. Кривая тепловыделения имеет один ярко выраженный максимум, расположенный вблизи угла 11° ПКВ. При снижении мощности дизеля по винтовой характеристике максимальная скорость тепловыделения смещается ближе к ВМТ с 11° ПКВ до 7° ПКВ на режиме 75 % СМДМ. Для судовых малооборотных двигателей со средним индикаторным давлением 1,0 МПа максимальная скорость тепловыделения

достигалась при углах около 20° ПКВ, что также свидетельствует о более динамичном характере сгорания в цилиндрах дизелей со средним индикаторным давлением 2,0 МПа.

Сравнение процессов тепловыделения двигателей с различными значениями среднего индикаторного давления представлено на рис. 5. Процессы тепловыделения в двигателях с $p_i \geq 1,0$ МПа, как показано в работе [2], мало отличаются друг от друга. Процесс тепловыделения двигателя 6ДКРН 50/200-14, имеющего среднее индикаторное давление 2,0 МПа, значительно отличается от процессов тепловыделения двигателей со средним индикаторным давлением 1,0 МПа (кривая 7 на рис. 5). Так, к моменту поворота коленчатого вала на угол 15° ПКВ в цилиндрах дизеля 7ДКРН 80/160-4 сгорает до 30 % цикловой подачи топлива, в то время как в цилиндрах дизеля 6ДКРН 50/200-14 до 55 %.

При решении задач оптимизации и доводки рабочего процесса дизелей необходимо иметь возможность правильно задавать закон тепловыделения в набор исходных данных для имита-

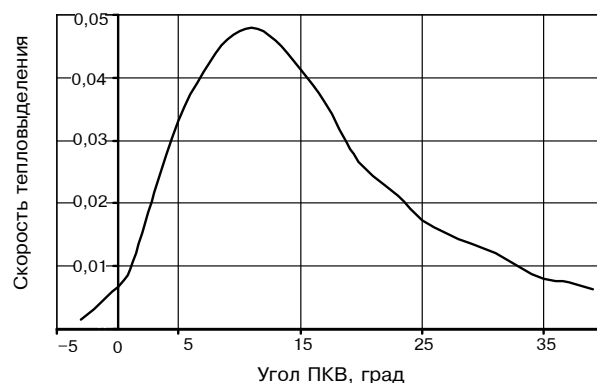


Рис. 4. Изменение скорости тепловыделения $dx/d\varphi = f(\varphi)$ на режиме 100% СМДМ

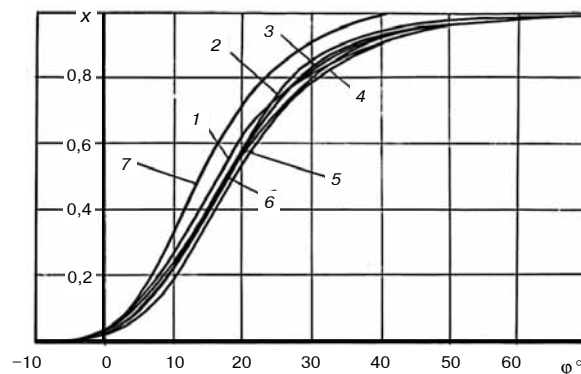


Рис. 5. Характеристики тепловыделения малооборотных дизелей:

1 — 5ДКРН 50/110-2; 2 — 8ДКРН 74/160-3;
3 — 7ДКРН 80/160-4; 4 — 6ДКРН 74/160-2;
5 — 9ДКРН 80/160-4; 6 — обобщенный закон тепловыделения для двигателей со средним индикаторным давлением 1,0 МПа; 7 — 6ДКРН 50/200-14

ционного моделирования рабочего процесса на ЭВМ, что обеспечивает высокую точность соответствия результатов моделирования экспериментальным данным. Численное моделирование рабочего процесса по методике [5] режимов винтовой характеристики дизеля 6ДКРН 50/200-14, выполненное с использованием полученных в настоящей работе кривых тепловыделения (см. рис. 3), позволило обеспечить полное совпадение результатов моделирования с результатами стендовых испытаний двигателя.

Выводы

Исследование закона тепловыделения в цилиндрах мощного судового малооборотного дизеля 6ДКРН 50/200-14, имеющего среднее индикаторное давление 2,0 МПа, показало, что экспериментальные кривые тепловыделения могут быть с большой точностью аппроксимированы зависимостью Вибе. На режиме спецификационной максимальной длительной мощности коэффициенты формулы Вибе, полученные по

методу наименьших квадратов, имеют значения $\theta = -3^\circ$ ПКВ, $m = 1,10$ и $\varphi_z = 52^\circ$ ПКВ. Процесс тепловыделения начинается практически в ВМТ, протекает более динамично, чем в двигателях с $p_i \geq 1,0$ МПа, и завершается к моменту 40° ПКВ. При снижении нагрузки форма закона тепловыделения существенно изменяется. Угол наклона участка активного тепловыделения на кривой $x = f(\varphi)$ возрастает, продолжительность сгорания, выраженная в градусах поворота коленчатого вала, сокращается (коэффициенты m и φ_z уменьшаются).

Полученные характеристики тепловыделения могут быть использованы при различных исследованиях, связанных с имитационным моделированием рабочего процесса судовых малооборотных дизелей, имеющих среднее индикаторное давление 2,0 МПа, так как все программы численного моделирования рабочего процесса требуют в исходных данных обязательного задания формы кривой тепловыделения.

Литература

1. Лазурко В.П., Кудрявцев В.А. Программа обработки индикаторных диаграмм на алгоритмическом языке «базисный ФОРТРАН»: Труды ЦНИДИ. — Л.: 1975. — Вып. 68. — С. 46–54.
2. Пахомов Ю.А., Хак Д.Л., Рогалев В.В. Идентификация параметров кривой тепловыделения малооборотных дизелей // Двигателестроение. — 1981. — № 10 — С. 8–9.
3. Пахомов Ю.А., Рогалев В.В., Пирогов Д.Н. Исследование закона тепловыделения судовых ма-

лооборотных дизелей в широком диапазоне эксплуатационных режимов нагружения: Труды ЦНИДИ. — Л.: 1982. — С. 41–50.

4. Пахомов Ю.А., Рогалев В.В., Коробков Ю.П., Соколов Ю.А. Особенности процесса тепловыделения длинноходовых малооборотных дизелей // Двигателестроение. — 1987. — № 11 — С. 9–11.

5. Иванченко Н.Н., Красовский О.Г., Соколов С.С. Высокий наддув дизелей. — Л.: Машиностроение, 1983. — 198 с.

Турбокомпрессоры для наддува двигателей внутреннего сгорания. Атлас конструкций

На кафедре «Турбины и двигатели» Уральского государственного технического университета-УПИ издана книга «Турбокомпрессоры для наддува двигателей внутреннего сгорания. Атлас конструкций» (авторы Солнцев Д. М., Шестаков Д. С.).

Издание обращено к широкому кругу читателей: профессионалам, работающим на предприятиях, выпускающих турбокомпрессоры и двигатели, студентам и преподавателям вузов; любителям техники.

В атласе представлены конструкции турбокомпрессоров, выпускаемых предприятиями и фирмами России и других стран, описываются конструктивные схемы агрегатов наддува, анализируются их достоинства и недостатки.

Основными типами иллюстраций являются продольные и поперечные разрезы турбо-

компрессоров, их общие виды, чертежи некоторых узлов и деталей, графические зависимости. Большая часть представленных иллюстраций снабжена подробной спецификацией с обозначением основных агрегатов и деталей.

Иллюстрации и технические данные, приведенные в настоящем издании, заимствованы из различных источников: отечественных книг разных лет издания, заводских инструкций, журналов, каталогов, рекламных проспектов и др. Изобразительный материал характеризуется разнообразием стилей, степенью полноты изображения, проработанности деталей.

По большинству турбокомпрессоров, представленных в атласе, приведены основные конструктивные данные и рабочие параметры.

Формат издания А4 в твердом или мягком переплете, 308 с.

Издание можно заказать по адресу:

**620002, г. Екатеринбург, а/я 3а, кафедра «Турбины и двигатели» УГТУ-УПИ.
Тел.: (343) 375-48-51, 375-97-28 Факс: (343) 375-94-62 E-mail: TURBINE@BK.RU**