

УДК 621.43

С. В. Лебедев, Д. Д. Матиевский,
Г. В. Лебедева

ФОРМИРОВАНИЕ МОЩНОСТНЫХ ДИАПАЗОНОВ ПРИМЕНЕНИЯ КОНСТРУКТИВНОГО РЯДА ПОРШНЕЙ НА ДИЗЕЛЯХ ЧН15/15

Приведены результаты оценки показателей тепломеханической напряженности конструктивно унифицированных неохлаждаемого и охлаждаемого поршней и обоснованы мощностные диапазоны дизелей при различных способах ведения и уровнях форсирования индикаторного процесса.

Мощностные диапазоны дизелей поршневого комплекта определяются соотношением воспринимаемой тепловой нагрузки и реализованной, в результате проведения конструктивно-технологических мероприятий, прочностью. Поэтому в задачах совершенствования технических характеристик дизелей ЧН15/15 целесообразно делать акцент не на выборе, а на формировании мощностных диапазонов конструктивных модификаций поршневого комплекта. Достигается это путем совместного параметрического анализа воспринимаемой поршнем тепловой нагрузки, способа ведения рабочего процесса и предельно допустимого уровня показателей теплонапряженности с учетом конструктивно-технологических решений и способа охлаждения.

Реализация данного подхода позволила совместить отработку с позиций топливной экономичности параметров индикаторного процесса с оценкой показателей теплового нагружения поршневого комплекта и, сравнивая их с предельно допустимыми значениями, обосновать рациональные диапазоны применения модификаций поршневого комплекта разработанного конструктивного ряда. Выполненные работы заключались в следующем:

- исследование взаимосвязи определяющих параметров рабочего процесса с показателями теплового нагружения поршня в форме граничных условий 3-го рода ($\alpha_{г.ср} T_{г.ср}$);
- параметрический анализ рабочего процесса по показателям топливной экономичности и тепловой нагрузки поршневого комплекта;
- формирование рациональных мощностных диапазонов конструктивно унифицированных неохлаждаемой и сварной с полостью охлаждения модификаций поршневого комплекта типоразмерного ряда.

Зависимость тепловой нагрузки на поршень от параметров ведения индикаторного процесса. Взаимосвязь среднецикловых и средних за процесс теплоотдачи величин $\alpha_{г.ср}$, $T_{г.ср}$ и $\alpha_{г.ср.г}^{дет}$, $T_{г.ср.г}^{дет}$ с параметрами индикаторного процесса устанавливается и исследуется с использованием работы [1]. В ее основе — математическая модель цикла высокооборотного дизеля, позволяющая рассчитать текущие значения параметров рабочего тела и харак-

теристики тепловыделения по времени цикла $T_r, P_r, X = f(\alpha, \varepsilon, \lambda, P_a, T_a)$ в функции коэффициента избытка воздуха (α); степени повышения давления в цилиндре (λ); давления и температуры воздушного заряда в начале сжатия (P_a, T_a); степени сжатия (ε). Коэффициент теплоотдачи от рабочего тела в днище поршня в соответствии с использованной зависимостью ЦНИДИ [2] определяется уравнением вида:

$$\alpha_r = \left(2,75 + 58,6 \frac{D}{C_m} \right) \frac{\lambda_r}{\mu_r^{0,5}} \left(\frac{C_m}{D} \right)^{0,5} \left(\frac{P_r}{R_r T_r} \right)^{0,5},$$

где λ_r — коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К); μ_r — коэффициент вязкости газа, кг/(м·с); P_r и T_r — соответственно давление и температура газа, Н/м² и К; C_m — средняя скорость поршня, м/с; D — диаметр цилиндра, м; R_r — универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К).

Для конструктивно подобных дизелей множитель $\left(2,75 + 58,6 \frac{D}{C_m} \right) \times \left(\frac{C_m}{D} \right)^{0,5}$ вводится в разряд констант (N), после чего получается $\alpha_r = N \frac{\lambda_r}{\mu_r^{0,5}} \left(\frac{P_r}{R_r T_r} \right)^{0,5}$.
В результате

$$\begin{cases} T_r, P_r, X = f(\alpha, \varepsilon, \lambda, P_a, T_a); \\ \lambda_r, \mu_r = f(\alpha, X, T_r); \\ \alpha_r = N \frac{\lambda_r}{\mu_r^{0,5}} \left(\frac{P_r}{R_r T_r} \right)^{0,5}. \end{cases}$$

Решая систему уравнений, условие подобия параметров теплоотдачи от рабочего тела в днище поршня можно выразить зависимостью

$$\alpha_r, T_r f(\varepsilon, \alpha, \lambda, P_k, T_k)$$

(без заметной погрешности расчета принято $P_k \approx P_a, T_k \approx T_a$). Переход к среднецикловым параметрам: $\alpha_{г.ср.}, T_{г.ср.}$ ($\alpha_{г.ср.}^{дет}, T_{г.ср.}^{дет}$), основан на статистическом анализе результатов многовариантных расчетов. Определено, что значимыми факторами, ранжированными по степени влияния на $\alpha_{г.ср.}$ и $T_{г.ср.}$, являются: $\alpha, \varepsilon, \lambda, P_k$ — для $\alpha_{г.ср.}$ ($\alpha_{г.ср.}^{дет}$); $\alpha, T_k, \lambda, \varepsilon$ — для $T_{г.ср.}$ ($T_{г.ср.}^{дет}$). С целью удобства практического использования приведенной зависимости параметры $\alpha_{г.ср.}$ ($\alpha_{г.ср.}^{дет}$) и $T_{г.ср.}$ ($T_{г.ср.}^{дет}$) представлены в виде функции взаимосвязанных параметров дизеля: $P_{max}/P_k, \alpha, \varepsilon, \lambda, T_k$, и сохранен методический подход к выбору их наиболее выгодного сочетания, аналогично поиску оптимального значения η_i [3]. Влияние параметров наддувочного воздуха на входе в цилиндр отражено в виде дополнительных множителей — соответственно $\alpha_{г.ср.}^{II}/P_k^{0,5} = f(P_{max}/P_k, \alpha)$ и $T_{г.ср.}^{II}/(T_k/350)^{0,5} = f(P_{max}/P_k, \alpha, \varepsilon)$ [4]. Таким образом, реализованы условия для выполнения совмещенного параметрического анализа характеристик индикаторного процесса и термомеханической напряженности поршневого комплекта в функции величин $P_{max}/P_k, \alpha$ и ε или $\varepsilon, \alpha, \lambda, P_k$ и T_k , учитывая $P_{max}/P_k = \varepsilon^n \lambda$.

На основе установленных взаимосвязей сформулированы основные принципы выбора параметров дизеля при его форсировании с учетом ограничения тепловой нагрузки на детали ЦПГ. В частности, использование λ в структуре обобщенных зависимостей $\alpha_{г.ср}$ и $T_{г.ср}$ позволило объяснить часто противоречивые экспериментальные данные по влиянию динамики индикаторного процесса, а также ограничения по P_{max} по уровню тепловой нагрузки на поршень. Показано, что значительный эффект снижения тепловой нагрузки на детали дизеля дает организация индикаторного процесса с низкой динамикой (λ), причем, влияние согласованного снижения λ и повышения ε усиливается по мере уменьшения α , сопровождающего форсирование дизеля по P_{mi} .

Совмещенный параметрический анализ индикаторного процесса и тепловой нагрузки на поршень. Особенность реализации изложенного метода, позволяющего решить задачу совместного параметрического анализа рабочего процесса по показателям топливной экономичности и тепловой нагрузки на поршень, заключалась в одновременном охвате всего исследуемого диапазона форсирования дизелей типоразмера по P_{mi} . Такой подход отвечает условию унификации, создает предпосылки к выработке единых принципов ведения индикаторного процесса и возможности более полно оценить эффективность принимаемых решений по комплектованию моделей типоразмера (в первую очередь агрегатами систем топливоподдачи и воздухоснабжения). Используя обобщенные взаимосвязи параметров индикаторного процесса η_i , $P_{max}/(P_{mi}T_k) = f(\varepsilon, \alpha, P_{max}/P_k)$ [5] для исследуемых уровней перспективного форсирования $P_{mi} = 1,2; 1,4; 1,6$ МПа определены возможные варианты ведения индикаторного процесса в виде сочетаний величин α , P_a , λ , ε (четыре комбинации по числу фиксированных уровней $\alpha = const$) при ограничениях P_{max} и выбранном варианте системы охлаждения наддувочного воздуха по условию $T_a = const$. Задавая предельные значения P_{max} учитывают реальные запасы прочности деталей ЦПГ и КШМ и реализацию в пределах мощностного ряда дизелей условия приблизительного постоянства удельного эффективного расхода топлива $b_e \approx const$. Введение характерного для P_{max} допуска на его задание $\delta P_{max} = \pm 2,5\%$ увеличило количество комбинаций α , P_k , λ , ε с 4 (по числу фиксированных $\alpha = const$) до 8. Для каждой из них по разработанной методике [1] вычислены значения $\alpha_{г.ср.т}^{дет}$ и $T_{г.ср.т}^{дет}$, после чего их сочетания в виде точек нанесены в поле номограммы $\alpha_{г.ср.т}^{дет} - T_{г.ср.т}^{дет}$ (рис. 1). Каждому из анализируемых уровней форсирования по P_{mi} в поле номограммы соответствует своя локальная область, ограниченная соответствующими 8 сочетаниями $\alpha_{г.ср.т}^{дет}$ и $T_{г.ср.т}^{дет}$.

По величине показателей топливной экономичности все рассматриваемые сочетания параметров α , P_k , λ , ε являются инвариантными, поскольку при фиксированных P_{mi} реализуется условие $b_i = const$, а в диапазоне $P_{mi} = 1,2 \dots 1,6$ МПа — условие $b_e \approx const$. Для выбора их рациональных сочетаний по показателям тепловой напряженности в поле номограммы в форме изолиний постоянных значений введены показатели тепловой напряженности, лимитирующие надежную работу исследуемой конструкции поршня (максимальную температуру поверхности, температуру характерных зон конструкции $T_{дет}$, напряжения $\sigma_{дет}$). Источником для их получения могут на равном основании являться результаты предварительно выполненных натурных и расчетных исследований. Анализ нескольких критериев позволяет установить лимитирующие параметры и сконцентрироваться в дальнейшем

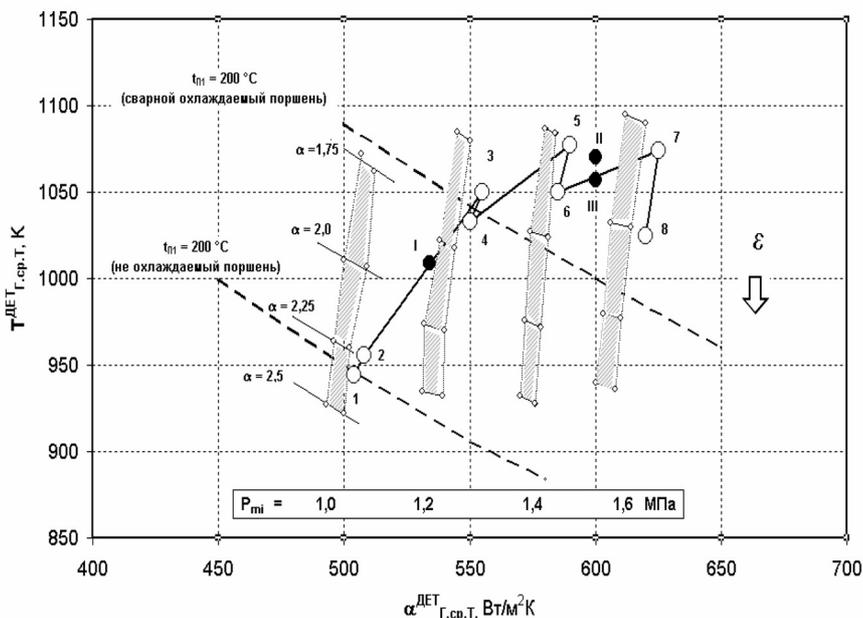


Рис. 1. Схема совмещенного параметрического анализа индикаторного процесса и тепловой нагрузки на детали ЦПГ при форсировании типоразмера ЧН15/15 по P_{mi} :

○ — увеличенное давление впрыска топлива и использование ОНВ ($t_w = 110^\circ\text{C}$, номера испытаний I–8 соответствуют данным табл. 1), ● — штатная комплектация (I — $\varepsilon = 15,3$; $P_{mi} = 0,96$ МПа, II — $\varepsilon = 15,3$; $P_{mi} = 1,17$ МПа; III — $\varepsilon = 14$; $P_{mi} = 1,17$ МПа)

при оптимизации индикаторного процесса именно на них. В рассматриваемом случае (см. рис. 1) надежность работы поршневого комплекта связана с уровнем характерной температуры в зоне первого компрессионного кольца $t_{п1} = 220^\circ\text{C}$. Важно, отметить, что разработанный подход не ограничен рамками анализа квазистационарного нагружения поршня. Возможны оценки конструкции поршня и по запасам усталостной прочности в отношении суммарных напряжений, возникающих от действия стационарного температурного поля и переменных нагрузок от воздействия P_{max} . В этом случае рационально использовать результаты усталостных испытаний поршня, обобщенные в виде диаграммы Гудмана, как в частности, на практике выполнено фирмой Веллворси, а также приведено в работах [6, 7].

Анализ расположения изолиний $T_{дет}$, $\sigma_{дет} = \text{const}$ и полей исследуемых уровней форсирования по P_{mi} , позволяет выполнить многовариантные оценки рациональной организации индикаторного процесса, закономерностей влияния его параметров на показатели теплового нагружения и в этой связи оценить целесообразность перехода на более совершенные конструкции поршней, в частности охлаждаемые.

Результаты исследований для перспективной комплектации дизелей подтверждают высокую эффективность повышения давления впрыска топлива и охлаждения наддувочного воздуха и в отношении их влияния на тепловую нагрузку поршня (см. рис. 1 и табл. 1).

№ варианта	ε	α	T_t , К	π_k	P_{mi} , МПа	η_i	$\alpha_{г.ср.г}^{дет}$, Вт/м ² К	$T_{г.ср.г}^{дет}$, К
1	15,3	2,3	840	2,45	0,98	0,456	500	945
2	17	2,15	850	2,25	0,97	0,458	505	960
3	17	1,85	955	2,55	1,2	0,439	560	1055
4	16	1,95	930	2,7	1,2	0,439	555	1030
5	16	1,8	980	2,95	1,39	0,432	595	1080
6	15,3	1,9	950	3,2	1,4	0,435	595	1050
7	15,3	1,85	975	3,5	1,6	0,426	630	1075
8	14	2,1	925	4	1,6	0,428	625	1015

При равной тепловой нагрузке на поршень резерв форсирования по P_{mi} в сравнении с базовой комплектацией дизеля составляет $\sim 20\%$: 1,4 МПа против 1,15 МПа. Превалирующее влияние на температурное состояние поршневого комплекта оказывает параметр α . Теоретически, его повышение с 1,75 до 2,25 ед. позволяет сохранить близкой к постоянной тепловую нагрузку на поршень в исследованном диапазоне P_{mi} и ограничиться применением неохлаждаемой модификации поршня. В реальных условиях обеспечение надежных пусковых характеристик дизелей ЧН15/15 лимитирует границы возможного снижения ε до 13...14 ед. Соответственно сужается и диапазон возможного изменения α , так как иначе, учитывая низкую динамику индикаторного процесса, не выполняется условие по ограничению P_{max} . В результате, переход на охлаждаемую маслом конструкцию поршня становится вынужденным уже при $P_{mi} \geq 1,2$ МПа.

Существенные ресурсы форсирования дизелей раскрывает применение глубокого охлаждения охлаждающей жидкостью надувочного воздуха дополнительного низкотемпературного контура дизеля с температурой $t_w \approx 65^\circ\text{C}$ (рис. 2).

При этом наряду с обеспечением требований по пусковым характеристикам дизелей ($\varepsilon = 14$ ед.), выполняется условие конструктивной унификации моделей типоразмера в отношении использования неохлаждаемой модификации поршня. Однако очевидные затруднения на режиме форсирования $P_{mi} = 1,6$ МПа связаны с выбором комплектации агрегата наддува для достижения необходимого значения $\pi_k \approx 3,7 \dots 3,8$ ед., соответствующего верхней границе значений, реализуемых в системах одноступенчатого наддува.

Характер влияния P_{max} на величину тепловой нагрузки на поршень не однозначен (рис. 3). В случае повышения P_{max} из-за ε при сохранении $\alpha = \text{const}$ и $\lambda = \text{const}$ имеет место взаимосвязанное увеличение $\alpha_{г.ср.г}^{дет}$ и снижение $T_{г.ср.г}^{дет}$, в результате которого уровень теплового нагружения поршня остается неизменным (кривые постоянства $\alpha = \text{const}$ эквидистантны линиям равных уровней показателя тепловой напряженности $t_{п1} = \text{const}$). В свою очередь, повышение P_{max} в силу увеличения λ при сохранении постоянным ε вызывает интенсивный рост тепловой нагрузки. Выполненные численные оценки

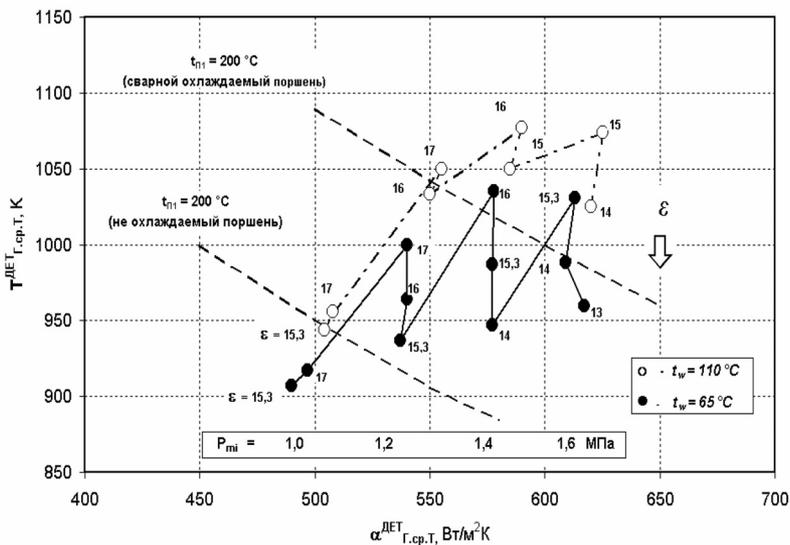


Рис. 2. Влияние интенсивности охлаждения наддувочного воздуха на тепловую нагрузку деталей ЦПГ дизелей ЧН15/15 при форсировании по P_{mi} :
 ○, ● — $t_w = 110^\circ\text{C}, 65^\circ\text{C}$

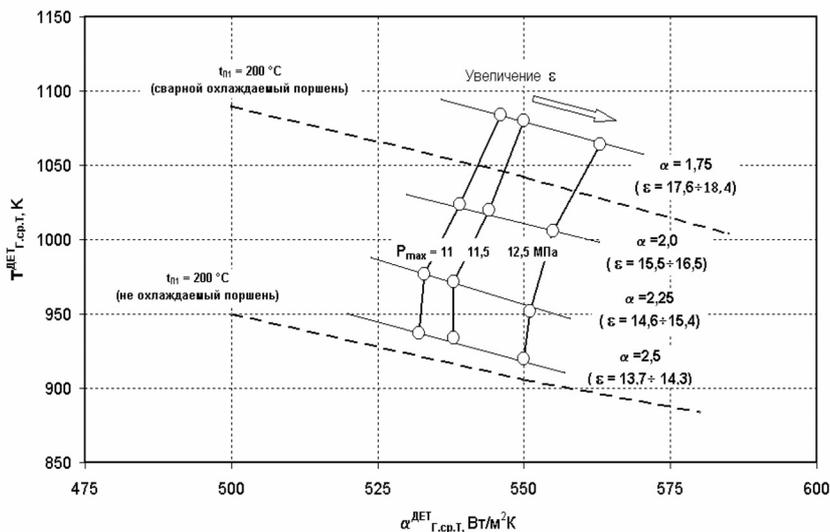


Рис. 3. Влияние параметров ведения индикаторного процесса на тепловую нагрузку деталей ЦПГ

показали, что влияние λ , к тому же прогрессивно усиливается на меньших α . Уже при достижении $\alpha = 1,5$ ед. рост $t_{п1}$ из-за увеличения λ в определенных границах становится, сопоставимым с влиянием форсирования дизеля по P_{mi} , выполняемого при условии $\epsilon = \text{const}$.

Выполненные оценки свидетельствуют о том, что выбор такого важного показателя дизеля, как величина степени сжатия при развитии мощного ряда дизелей форсированием по P_{mi} требует взаимосвязанного анализа влия-

ния ε не только на пусковые характеристики, показатели топливной экономичности из условия эффективного сгорания увеличенных подач топлива, но и на уровень теплового нагружения поршневого комплекта и выбор его рациональной конструкции. Поэтому в конструктивных решениях, использованных при разработке охлаждаемой сварной конструкции поршневого комплекта, предусмотрена возможность изменения величины ε на моделях перспективного мощностного ряда ЧН15/15 в пределах от 13 до 17 ед.

Таким образом, разработанный метод, реализуя в своей основе принцип воздействия на величину тепловой нагрузки, позволяет полнее использовать потенциал различных конструктивных схем поршневого комплекта, расширяя мощностные диапазоны их применения при форсировании дизеля по среднему эффективному давлению. В соответствии с ориентировочной оценкой по величине P_{mecm} тепловая нагрузка неохлаждаемого монометаллического поршня из алюминиевого сплава фактически достигла и превысила предельные значения на базовом уровне форсирования $P_{mi} = 0,95$ МПа типоразмера дизелей ЧН15/15, а его модификация с полостью масляного охлаждения исчерпывает свои возможности при $P_{mi} = 1,6$ МПа. Данные выполненного параметрического анализа свидетельствуют, что выбирая рациональные условия ведения индикаторного процесса надежная работа неохлаждаемой модификации может быть обеспечена до $P_{mi} = 1,3 \dots 1,4$ МПа; предел же использования охлаждаемой конструкции поршня в исследованном диапазоне P_{mi} не достигается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев С. В. Инженерная методика комплексной расчетной оптимизации параметров форсированных высокооборотных дизелей // Двигателестроение. – 1998. – № 3. – С. 5–12.
2. Влияние конструктивно-регулирующих показателей и степени форсирования на коэффициент теплоотдачи от газов к поверхности деталей ЦПГ / Н.И. Молодцов, П.В. Соколов, Я.Я. Власов // Труды ЦНИДИ. – 1975. – Вып. 69. – С. 3–17.
3. Выходной наддув дизелей / Н.Н. Иванченко, О.Г. Красовский, С.С. Соколов. – Л.: Машиностроение, 1983. – 198 с.
4. Лебедев С. В., Нечаев Л. В. Совершенствование показателей высокооборотных дизелей унифицированного типоразмера. – Барнаул: АлтГТУ, 1999. – 112 с.
5. Лебедев С. В., Матиевский Д. Д., Лебедева Г. В. Перспективы форсирования высокооборотных многоцелевых дизелей ЧН15/15 с учетом термомеханической напряженности поршневого комплекта // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. – 2003. – № 4. – С. 68–78.
6. Мурро Р., Гриффитс В. Д. Конструирование поршней дизелей и расчет их характеристик // Форсированные дизели. Доклады на XI Международном конгрессе по двигателям (СИМАК). – М.: Машиностроение, 1978. – С. 127–151.
7. Напряженно-деформированное и тепловое состояние охлаждаемого поршня тракторного дизеля при различном расположении поперечного сечения полости охлаждения / Е.А. Лазарев, Н.А. Иващенко, М.Л. Перлов, А.А. Бондарев // Двигателестроение. – 1989. – № 2. – С. 7–11.

Статья поступила в редакцию 11.12.02