

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОФОРСИРОВАННОГО ДИЗЕЛЯ С РЕГУЛЯТОРОМ ТЕМПЕРАТУРЫ НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА

Канд. техн. наук., доц. **ВЕРШИНА Г. А.**, инж. **ТАМКОВИЧ Е. С.**

Белорусский национальный технический университет

Условия эксплуатации высокофорсированных дизелей, применяемых на автомобильном транспорте и в сельском хозяйстве, характеризуются переменным во времени фактором скоростных и нагрузочных режимов. При этом наблюдается рассогласование характеристик системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ), что приводит к снижению производительности и экономичности двигателя внутреннего сгорания (ДВС), повышению дымности и токсичности выхлопных газов, росту динамических и тепловых перегрузок.

Важнейшим фактором процессов смесеобразования и сгорания, влияющих на основные показатели высокофорсированного двигателя, является система газотурбинного наддува. Высокие качественные характеристики используемых в конструкции турбокомпрессоров и промежуточных охладителей наддувочного воздуха (ПОНВ) – необходимое условие обеспечения улучшения топливной экономичности и экологичности двигателя. Система газотурбинного наддува в совокупности с ПОНВ является достаточно инерционной частью современного ДВС. В условиях динамического нагружения данное свойство обуславливает увеличение времени переходного процесса и ухудшает динамические характеристики ДВС. Одним из способов влияния на переходные процессы при работе ДВС на неустановившихся режимах является применение регулируемых турбокомпрессоров и ПОНВ, обеспечивающих оптимальное давление и относительно постоянную температуру на входе в двигатель.

Для изучения динамических свойств силовой установки, построения ее амплитудно-фазовых частотных характеристик и выбора оптимальных параметров элементов САРЧ разработана математическая модель высокофорсированного дизельного двигателя с ПОНВ, в основу которой положены конструктивные решения, а также нелинейная динамическая модель механического автоматического регулятора частоты вращения УТНМ-5 с пневматическим корректором топливоподачи [1...3].

Она включает в себя следующие уравнения элементов:

- двигателя;
- турбокомпрессора с регулируемым наддувом;
- промежуточного охладителя с регулятором температуры наддувочного воздуха;
- впускного коллектора;
- выпускного коллектора;
- автоматического регулятора частоты вращения.

Модель учитывает рабочие процессы в цилиндре ДВС, в том числе в процессе подачи, испарения и сгорания топлива в зависимости от угла поворота коленчатого вала по методике Н. С. Разлейцева [4]. Таким образом, в любой момент времени определяются давление газов в цилиндре и крутящий момент двигателя.

Динамическая модель САРЧ высокофорсированного дизеля имеет вид:

$$\begin{cases}
 \frac{d\omega}{d\varphi} = \frac{(M_i - M_c - M_n)}{J_m 6n}; \\
 \frac{d\omega_k}{d\varphi} = \frac{M_t - \Delta M_t - M_{т.к}}{J_k 6n}; \\
 \frac{dT_s}{d\varphi} = \frac{G_a C_{pa} (T_k - T_s) - \alpha_a F_a (T_s - T_\theta)}{g_a C_{pa} 6n}; \\
 \frac{dT_w}{d\varphi} = \frac{\alpha_w F_w (T_\theta - T_w) - G_w C_{pw} (T_w - T_\theta)}{g_w C_{pw} 6n}; \\
 \frac{dT_\theta}{d\varphi} = \frac{\alpha_a F_a (T_s - T_\theta) - \alpha_w F_w (T_\theta - T_w)}{G_m C_m 6n}; \\
 \frac{dp_k}{d\varphi} = 10^{-3} p_{к.н\kappa} \left(G_k - \sum_{i=1}^n \frac{dG_i}{d\varphi} 6n \right) / V_s \rho_k 6n; \\
 \frac{dp_{г.т}}{d\varphi} = 10^{-3} p_{г.т} n_t (G_r - G_{г.т}) / V_{вып} \rho_{г.т} 6n; \\
 \frac{dW_1}{d\varphi} = (-E_1 - E_2 + P_{ц} - v_1 W_1) / m_1 6n; \\
 \frac{dh_1}{d\varphi} = W_1 / 6n; \\
 \frac{dW_2}{d\varphi} = (E_2 - E_3 + E_4 - v_2 W_2) / m_2 6n; \\
 \frac{dh_2}{d\varphi} = W_2 / 6n; \\
 \frac{dW_3}{d\varphi} = (E_5 - E_4 - v_3 W_3) / m_3 6n; \\
 \frac{dh_3}{d\varphi} = W_3 / 6n;
 \end{cases} \quad (1)$$

где ω , ω_k – угловая скорость коленчатого вала и ротора турбокомпрессора соответственно; n – частота вращения коленчатого вала двигателя; φ – угол поворота коленчатого вала двигателя; M_i – индикаторный крутящий момент двигателя; M_c – момент механических потерь; M_n – нагрузочный момент; J_m – момент инерции вращающихся и приведенных к коленчатому валу возвратно-поступательно движущихся масс КШМ; J_k – то же ротора турбокомпрессора; M_t , $M_{т.к}$ – моменты, развиваемые турбиной и компрессором; ΔM_t – дополнительный момент, противоположный моменту, создаваемому турбиной, образующийся в результате перепуска излишек сжатого компрессором воздуха в случае достижения давления наддува p_k

значений, выше номинального $p_{к.ном}$, и ограничивающий частоту вращения ротора турбокомпрессора; G_a – расход сжатого воздуха через ПОНВ; G_b – то же воздуха через один цилиндр двигателя; G_w – то же теплоносителя (воздуха); G_k – то же воздуха через компрессор; g_a – масса воздуха в охлаждаемой части ПОНВ; g_w – то же теплоносителя (воздуха) в ПОНВ; T_s – температура во впускном коллекторе; C_{pa} , C_{pw} – теплоемкости наддувочного воздуха и теплоносителя при $p = \text{const}$; F_w , F_a – регулируемые площади поверхностей ПОНВ со стороны теплоносителя (наружная) и в самом охладителе (внутренняя); α_a , α_w – коэффициенты теплоотдачи от наддувочного воздуха материалу ПОНВ и от материала ПОНВ – теплоносителю (воздуху); G_r – расход газов через двигатель; $G_{г.т}$ – расход газов через турбину; G_m , C_m – масса и теплоемкость материала охладителя; T_k , p_k – температура и давление воздуха после компрессора; $p_{г.т}$ – давление отработавших газов перед турбиной; T_w – температура теплоносителя при его выходе из ПОНВ; T_θ – температура материала ПОНВ; T'_s – температура воздуха после ПОНВ; V_s – суммарный объем впускного коллектора и ПОНВ; $V_{вып}$ – объем выпускного коллектора; ρ_k , $\rho_{г.т}$ – плотность воздуха после компрессора и газов перед турбиной; $n_{к\kappa}$ – показатель политропы сжатия для впускного коллектора и неохлаждаемого трубопровода; n_t – показатель политропы расширения газов перед турбиной; h_1 , W_1 , h_2 , W_2 , h_3 и W_3 – перемещения и скорости промежуточного (ход рейки ТНВД), основного рычагов регулятора и штока пневмокоректора; E_1 , E_2 , E_3 , E_4 , E_5 – восстанавливающие силы регулятора; m_1 , m_2 , m_3 – приведенные массы рейки топливного насоса высокого давления (ТНВД), рычага регулятора и пневмокоректора; v_1 , v_2 , v_3 – факторы торможения трения муфты, основного рычага регулятора и рейки ТНВД; $P_{ц}$ – поддерживающая сила регулятора.

Проведенные по данной модели расчетные исследования показали, что объем ПОНВ и температура наддувочного воздуха на выходе из охладителя имеют значительное влияние на время переходного процесса и рабочий процесс двигателя. При уменьшении нагрузки на двигатель, оснащенный нерегулируемым ПОНВ, особенно в условиях отрицательных температур

окружающей среды, давление воздуха значительно меньше и глубина его охлаждения в промежуточном охладителе будет более высокой, что приводит к нарушениям процесса сгорания, а следовательно, к ухудшению экономических и экологических показателей дизеля. Теоретические исследования показали, что неизменная температура наддувочного воздуха на входе в двигатель позволяет достичь более высоких и стабильных показателей последнего.

На основании сделанных выводов была разработана конструкция ПОНВ с автоматическим регулятором (рис. 1), обеспечивающим относительное постоянство температуры наддувочного воздуха на различных режимах работы дизеля.

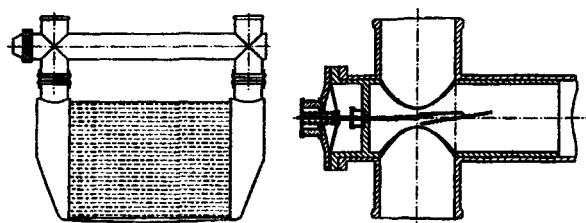


Рис. 1. ПОНВ с автоматическим регулятором температуры наддувочного воздуха

Особенностью данной конструкции является дополнительный канал, напрямую соединяющий напорный патрубок турбокомпрессора с впускным коллектором двигателя. Внутри данного канала установлен регулятор температуры наддувочного воздуха, выполненный в виде чувствительного элемента по давлению наддува, а именно – мембраны, и регулирующего расходного элемента в виде дроссельной заслонки. При изменении давления в напорном патрубке за счет разности давлений атмосферного и наддува мембрана регулятора температуры, передвигаясь, начнет преодолевать сопротивление пружины и передвигать шток с асимметрично закрепленной на нем дроссельной заслонкой, изменяя тем самым проходные сечения каналов. Сжатый нагретый воздух из компрессора частично начнет поступать напрямую, с минимальными гидравлическими потерями, минуя охладитель, в проточный канал и далее – во впускной коллектор, тем самым повышая температуру до необходимого уровня.

Температура воздуха после охладителя определяется по формуле

$$T_k = T_0 \left(\frac{p_k}{p_0} \right)^{\frac{n}{n-1}},$$

где T_0 , p_0 – температура и давление окружающей среды; T_k , p_k – то же наддувочного воздуха после компрессора; n – показатель политропы сжатия в компрессоре.

Из формулы видно, что температура наддувочного воздуха зависит от давления наддува p_k и условий окружающей среды T_0 и p_0 . Поскольку регулятор температуры наддувочного воздуха выполнен в виде чувствительного элемента по давлению, с целью повышения точности регулирования в зависимости от температуры окружающей среды снаружи регулятора установлен температурный компенсатор, выполненный из материала с высоким коэффициентом линейного расширения, который, изменяя свои геометрические размеры под воздействием температуры T_0 и, следовательно, жесткость пружины, обеспечивает необходимую поправку.

Таким образом, предлагаемая конструкция ПОНВ обеспечивает эффективное регулирование температуры наддувочного воздуха при динамическом нагружении и ее относительное постоянство во впускном коллекторе двигателя вне зависимости от параметров окружающей среды.

Исследования, выполненные с помощью приведенной математической модели, а также сравнительные испытания образцов ПОНВ серийной и экспериментальной конструкций, проведенные на РУП «Минский моторный завод», показали следующее:

1. При коэффициентах избытка воздуха менее 3,2 экономические показатели двигателя при его работе с серийным и экспериментальным ПОНВ на установившихся режимах являются практически равнозначными (рис. 2).
2. При значениях коэффициента избытка воздуха более 3,2 наблюдается тенденция к снижению удельного эффективного расхода топлива (рис. 2, 3).
3. Применение экспериментального ПОНВ обеспечивает увеличение на 7 % интенсивности прогрева охлаждающей жидкости при пуске двигателя, а также способствует увеличению отвода теплоты от масляного картера двигателя

(рис. 4). Последнее объясняется снижением количества теплоты, передаваемой материалом ПОНВ потоку охлаждающего воздуха с вентилятора, при перепуске наддувочного воздуха мимо охладителя.



Рис. 2. Зависимость удельного эффективного расхода топлива g_e от коэффициента избытка воздуха α по нагрузочной характеристике

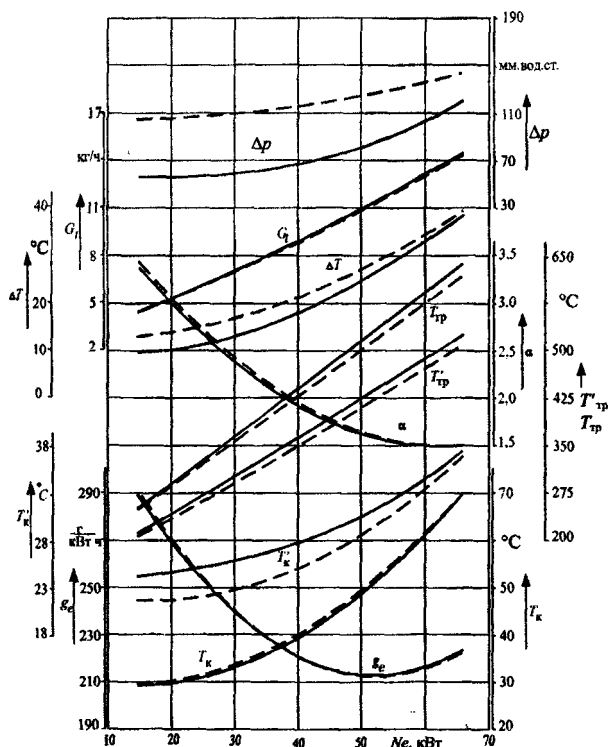


Рис. 3. Нагрузочная характеристика дизеля ($n = 1400$ об/мин): — — экспериментальный ПОНВ; - - - стандартный ПОНВ; N_e — эффективная мощность двигателя; α — коэффициент избытка воздуха; g_e , G_e — удельный эффективный и часовой расходы топлива; T_k , T'_k — температура наддувочного воздуха перед и после ПОНВ; T_{tr} , T'_{tr} — то же отработавших газов перед и после турбины; ΔT , Δp — перепад температуры и потери давления в ПОНВ

4. Перепуск части воздушного заряда, минуя ПОНВ, с целью сохранения его температуры при работе двигателя в области малых на-

грузок и холостого хода способствует уменьшению периода задержки воспламенения и снижению выбросов СН и твердых частиц, так как температура свежего заряда на данных режимах возрастает на $20 \dots 25$ °С.

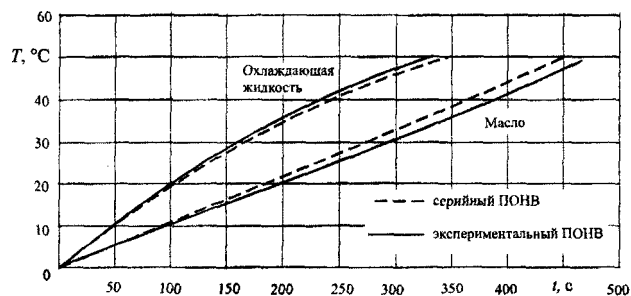


Рис. 4. Графики прогрева охлаждающей жидкости и масла

5. Применение регулятора температуры наддувочного воздуха сокращает время переходного процесса двигателя при мгновенном набросе номинальной нагрузки на $6 \dots 8$ %.

6. Применение предложенного регулятора температуры не требует разработки специальной конструкции охладителя, так как за счет дополнительного канала он может применяться на дизелях, оснащенных ПОНВ серийной конструкции.

ВЫВОД

Разработанная конструкция ПОНВ с регулятором температуры наддувочного воздуха обеспечивает эффективное регулирование температуры наддувочного воздуха и ее относительное постоянство во впускном коллекторе двигателя, что позволяет достичь более высоких технико-экономических и экологических показателей на режимах низких нагрузок, а также в условиях динамического нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вершина Г. А., Тамкович Е. С. Моделирование работы систем высокофорсированных дизелей. — Мн.: Вестник БНТУ. — 2002. — № 5. — С. 63–67.
2. Математическая модель САРЧ дизеля с наддувом // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: Материалы 2-й междунар. науч.-техн. конф. 21–23 мая 2003 г. — Ч. 2. — Пенза: ПГАСА, 2003. — 500 с.
3. Пат. № 6510 РБ, МКИ F02 B29/04, 33/44. Двигатель внутреннего сгорания / Г. А. Вершина, Е. С. Тамкович, П. Н. Янченко // Изобретения, полезные модели и промышленные образцы: Инф. бюл. — 2004. — № 3.
4. Разлейцев Н. С. Моделирование и оптимизация процессов сгорания в дизелях. — Харьков, 1980. — 165 с.