

УДК 623.1/7

doi: 10.18698/0536-1044-2024-01-90-100

Математическое моделирование дизельного двигателя, оборудованного турбокомпрессором с регулируемым сопловым аппаратом

Е.А. Юдников

Военная академия материально-технического обеспечения им. А.В. Хрулева

Mathematical modeling of a diesel engine equipped with a turbocharger with an adjustable nozzle

E.A. Yudnikov

Branch of the Military Academy of Logistics named after A.V. Khrulev

Повышение подвижности боевых бронированных машин, состоящих на вооружении армии Российской Федерации, — актуальное направление совершенствования вооружения и военной техники сухопутных войск. Одним из путей повышения уровня подвижности боевых машин, оборудованных дизельным двигателем с газотурбинным наддувом, является улучшение его характеристик в неустойчивых режимах работы, когда происходит рассогласование подачи топлива и необходимого для его сгорания воздуха. Проведен анализ возможных технических решений по согласованию гидравлических характеристик агрегатов наддува и дизельного двигателя с целью их применения при производстве и модернизации боевых машин. Определено оптимальное техническое решение, позволяющее согласовать подачу воздуха в дизельный двигатель при неустойчивых режимах работы. Разработана математическая модель для определения основных показателей дизельных двигателей, оборудованных турбокомпрессором с регулируемым сопловым аппаратом турбины, с учетом специфики их размещения в моторно-трансмиссионном отделении боевой машины. Предложено техническое решение по применению на существующих объектах вооружения и техники таких дизельных двигателей. Выполнена оценка эффективности разработанной модели и технического решения в соответствии с утвержденными методиками определения подвижности боевых машин, которая показала, что применение разработанной полезной модели позволит повысить уровень подвижности боевых бронированных машин при незначительных затратах.

Ключевые слова: математическая модель, дизельный двигатель, турбокомпрессор, регулируемый сопловый аппарат

Increasing the mobility of armored combat vehicles in service with the Russian Army is an urgent direction for improving the weapons and military equipment of the Ground Forces. One of the ways to increase the mobility of combat vehicles equipped with gas turbine supercharged diesel engines is to improve the characteristics of a diesel engine in unsteady operating modes when there is a mismatch in the supply of fuel and the air necessary for its combustion. The analysis of possible technical solutions for the coordination of the hydraulic characteristics of the supercharging units and the diesel engine, and the possibility of their use in the production and modernization of combat vehicles. The optimal technical solution has been determined, which makes it possible to coordinate the air supply to the engine in unsteady operating modes. A mathematical model has been developed to determine the main indicators of diesel engines equipped with turbochargers with an adjustable tur-

bine nozzle, taking into account the specifics of the engine placement in the engine and transmission compartment of a combat vehicle. A technical solution has been proposed for the use of such diesel engines at existing weapons and equipment facilities. The effectiveness of the developed model and technical solution was evaluated in accordance with the approved methods for assessing the mobility of combat vehicles, which showed that the use of the developed utility model will increase the level of mobility of the BBM at low cost.

Keywords: mathematical model, diesel engine, turbocharger, adjustable nozzle unit

Боевые бронированные машины (ББМ) составляют основу ударных сил сухопутных войск всех ведущих стран мира. Улучшение подвижности танков и других ББМ на поле боя — один из основных вопросов, на который обращают внимание экипажи ББМ.

Под подвижностью подразумевают одно из основных боевых свойств наземного образца военной техники, характеризующее его способность перемещаться по кратчайшему пути и преодолевать расстояние между заданными пунктами за минимальное время без дополнительных средств поддержания движения. Основными критериями подвижности являются средняя скорость движения и запас хода по топливу.

К ББМ предъявляют требования по запасу хода, контрольному расходу топлива и моторного масла при движении по грунтовым дорогам не менее 400 км [1, 2]. В концептуальных документах по развитию бронетанкового вооружения и техники к ББМ предъявляют еще более жесткие требования: запас хода по топливу — не менее 600 км, средняя скорость по сухой грунтовой дороге — не менее 50 км/ч.

Состоящие на вооружении армии Российской Федерации ББМ, созданные по требованиям прошлого столетия, не достигают параметров, заложенных в современных требованиях. Так, у современных и перспективных российских танков средняя скорость по грунтовой дороге составляет около 35 км/ч и запас хода по топливу — не более 345 км [3, 4].

Производство новых ББМ будет очень дорогостоящим. Проведение модернизации состоящих на вооружении ББМ, в ходе которой можно приблизить параметры к требуемым, представляется рациональным путем повышения их военно-технического уровня [5].

Подвижность ББМ, зависящую от характеристик силовой установки, можно улучшить увеличением удельной мощности ББМ [6]. Показатели удельной мощности современных и перспективных ББМ в большинстве случаев обеспечиваются применением в составе сило-

вых установок дизельных двигателей (далее дизели) с газотурбинным наддувом (ГТН).

Одним из основных недостатков дизелей с ГТН является инерционность ротора турбокомпрессора (ТК). В режиме разгона дизеля (в неустановившемся режиме работы), когда за короткий промежуток времени подача топлива в цилиндры дизеля увеличивается до максимальной, наличие инерции ротора ТК приводит к рассогласованию подачи топлива и воздуха. Последнего не хватает для полного сгорания топлива, вследствие чего ухудшается протекающие рабочего процесса, и дизель не может развить крутящий момент, который бы мог обеспечить при оптимальном соотношении топлива и воздуха [7].

Расход топлива на единицу проведенной дизелем работы возрастает по сравнению с таковым в установившемся режиме, увеличивается время разгона дизеля. Так как силовые установки ББМ большую часть времени функционируют в неустановившихся режимах, уменьшается средняя скорость движения и запас хода ББМ [8].

При работе дизеля с нерегулируемым ТК по внешней скоростной характеристике наблюдается снижение давления наддува и, как следствие, расхода воздуха. Это является причиной недостаточного повышения крутящего момента, помпажа компрессора, повышенных выбросов вредных веществ, температуры отработавших газов (ОГ) и тепловой нагруженности элементов кривошипно-шатунного механизма при уменьшении частоты вращения коленчатого вала [9].

Оптимальный коэффициент избытка воздуха в момент разгона дизеля может обеспечить полное сгорание топлива и позволит ему развить максимальный крутящий момент при разгоне.

Цель работы — улучшение подвижности ББМ путем определения рациональных параметров регулируемого соплового аппарата (РСА) агрегата наддува дизеля 12ЧН15/18 при работе на неустановившихся режимах.

Исследованиями, связанными с устранением недостатков газотурбинных систем наддува в ББМ, занимались Г.Ю. Степанов, С.В. Дорогин, П.П. Исаков, А.А. Благодрагов, Л.В. Сергеев, Ф.П. Шпак, А.И. Макоклюев [10], О.А. Усов [11], Л.В. Сенькин [12], Р.В. Heley и другие ученые. Основываясь на результатах их исследований, инженерами были предложены различные технические решения, позволяющие улучшить протекание процессов сгорания топлива в неустановившихся режимах работы дизеля.

Анализ применения систем регулируемого ГТН показал, что в условиях модернизации существующих ББМ одним из наиболее оптимальных решений, способных устранить инерционность ротора ТК в режиме разгона дизеля, является использование РСА турбины [13]. Этот способ регулирования наддува относится к самым эффективным и не требует дополнительного забронированного объема в моторно-трансмиссионном отделении (МТО) ББМ, что не влечет за собой изменения компоновки.

Применение регулируемого наддува в дизелях, включая ББМ, исследовано в работах С.В. Харитонова [14], А.Н. Боковой [15], А.Г. Кузнецова [16, 17], Г.Д. Щербакова, А.Н. Солдатов, Е.П. Храмцова, Д.С. Агафонова [18] и С.Ю. Шелпакова [19]. Авторами проведена оценка различных способов регулируемого наддува и в зависимости от выбранного технического решения разработаны математические модели (ММ), описывающие процессы, протекающие в дизелях с турбонаддувом, в том числе и на неустановившихся режимах работы.

Главная цель разработанных имитационных моделей дизеля с регулируемым агрегатами наддува состоит в прогнозировании его выходных показателей (крутящего момента, мощности, расхода топлива) в зависимости от характеристик регулируемых агрегатов наддува.

Также эти ММ являются моделями смешанного (комбинированного) типа, так как они объединяют подходы, применяемые в теоретических и эмпирических моделях. Основой ММ служат фундаментальные дифференциальные модели, а для расчета коэффициентов и различных показателей используют экспериментальные данные [20]. Подобные модели позволяют ускорить настройку новых систем управления для перспективных дизелей.

Фундаментальные дифференциальные модели имеют вид

$$\begin{cases} \frac{d\omega_d}{dt} = \frac{M_i - M_{\text{п}} - M_c}{J_d}; \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{M_T - M_K}{J_T}; \\ \frac{dp_K}{dt} = \frac{R_B T_K (G_K - G_d)}{V_{\text{вп}}}; \\ \frac{dp_r}{dt} = \frac{R_r T_r (G_d + G_{\text{топ}} - G_r)}{V_{\text{вып}}}, \end{cases} \quad (1)$$

где ω_d и ω_r — угловая скорость коленчатого вала дизеля и ротора ТК; t — время; M_i — индикаторный крутящий момент дизеля; $M_{\text{п}}$ — момент внутренних потерь в дизеле; M_c — момент сопротивления на коленчатом валу дизеля; J_d — приведенный момент инерции дизеля и потребителя; M_T — крутящий момент, развиваемый турбиной ТК; M_K — крутящий момент, необходимый для привода компрессора; J_T — момент инерции ротора ТК; p_K — давление, создаваемое компрессором; R_B и R_r — газовая постоянная воздуха и ОГ; T_K — температура воздуха на выходе из компрессора; G_K и G_d — массовый расход воздуха через компрессор и поршневую часть дизеля; $V_{\text{вп}}$ и $V_{\text{вып}}$ — объем впускного и выпускного коллектора; p_r — давление ОГ в выпускном коллекторе дизеля; $G_{\text{топ}}$ — массовый расход топлива дизелем; G_r — массовый расход газа через турбину.

ММ, в основу которых положена система (1), обладают достаточной универсальностью, так как описывают процессы в дизеле с нерегулируемым турбонаддувом в стандартных условиях. Для применения ММ в дизелях с регулируемым агрегатами наддува указанная система должна быть дополнена уравнениями, описывающими связи изменяемых регулятором параметров наддува (прежде всего давления наддува) с характеристиками дизеля.

Функциональные связи между параметрами рабочего процесса в ММ задают в виде полиномов и матриц числовых значений [21]. Именно на таком (эмпирическом) уровне раскрытия связей характеристик дизеля и агрегатов наддува проявляются различия ММ дизелей с неодинаковыми по устройству системами регулируемого наддува. Это является одной из причин, не позволяющих построить универсальную ММ даже в рамках схожих по кон-

струкции агрегатов наддува, например турбин с изменяемой геометрией.

Предлагаемая ММ дизеля с регулируемым посредством РСА агрегатом наддува, по способу построения является комбинированной, а по количеству входных переменных — многомерной нелинейной динамической. Эта модель отличается от ранее разработанных ММ тем, что в ней учтены специфические условия размещения дизеля в МТО и определена функция относительного угла поворота лопаток соплового аппарата в агрегате наддува от момента сопротивления и угловой скорости коленчатого вала дизеля.

Разработанная ММ — комбинированная, так как связанные в модели параметры подразделены на два класса. Параметры первого класса определяются по универсальным выражениям — известным закономерностям физических и химических процессов, параметры второго класса — по эмпирическим формулам с использованием функциональных выражений, содержащих ограничения на их применение и касающихся дизелей только определенной конструкции.

К *первому классу* относятся параметры рабочего процесса дизеля: индикаторный крутящий момент дизеля M_i , массовый расход топлива $G_{\text{топ}}$, массовый расход воздуха через поршневую часть дизеля G_d , плотность наддувочного воздуха ρ , коэффициент избытка воздуха α , крутящий момент, необходимый для привода компрессора, M_k и крутящий момент, развиваемый турбиной ТК, M_T .

К *второму классу* относятся параметры, заданные в виде функциональных зависимостей, имеющих в своем составе эмпирические коэффициенты. Это — индикаторный коэффициент полезного действия (КПД) дизеля η_i , коэффициент наполнения η_v , адиабатический КПД компрессора $\eta_{\text{ад}}$, эффективный КПД турбины η_T , температура наддувочного воздуха T_k , температура ОГ в выпускном трубопроводе T_T , момент внутренних потерь в дизеле M_n , момент сопротивления нагрузки M_c , расход воздуха через компрессор G_k , расход ОГ через турбину G_T , степень понижения давления ОГ в турбине π_T , температура T_{k1} и давление p_{k1} воздуха на входе в компрессор.

Исходными данными для расчета параметров второго класса являлись результаты экспериментов, полученные в 2020 г. на ООО «ЧТЗ-УРАЛТРАК» при определении характе-

ристик дизеля В-92С2 (12ЧН15/18) — скоростной, нагруженных и холостого хода. Характеристики компрессора в точках совместной работы с дизелем в номинальном режиме и режиме максимальной мощности определены при безмоторных испытаниях в ГСКБД «Турбина» в 2017 г.

Для формирования используемых в ММ функциональных зависимостей проведена статистическая обработка экспериментальных и расчетных данных в программном комплексе STATISTICA 10 с использованием встроенной функции анализа нелинейной регрессии (Fixed Nonlinear Regression).

Зависимости параметров дизеля, агрегатов наддува и внешней среды образуют систему уравнений, представляющих собой ММ дизеля с агрегатом наддува, регулируемым путем изменения положения соплового аппарата турбины:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\omega_d}{dt} = \frac{M_i - M_n - M_c}{J_d}; \\ \frac{d\omega_T}{dt} = \frac{M_T - M_k}{J_T}; \\ \frac{dp_k}{dt} = \frac{R_b T_k (G_k - G_d)}{V_{\text{вп}}}; \\ \frac{dp_T}{dt} = \frac{R_T T_T (G_d + G_{\text{топ}} - G_T)}{V_{\text{вып}}}; \\ \bar{p}_T = f(\bar{\varphi}, \omega_d) \text{ при } \pi_k < \pi_{k\text{max}} \text{ и } \omega_T < \omega_{T\text{max}}; \\ T_k = T_{k1}(T_0) \left[1 + \frac{\left(\frac{p_k}{p_0 - \Delta P_{\text{ВО}}} (G_d, t) \right)^{(k-1)/k} - 1}{\eta_{\text{к.ад}}} \right], \end{array} \right. \quad (2)$$

где \bar{p}_T — относительное статическое давление ОГ перед турбиной; $\bar{\varphi}$ — относительный угол поворота лопаток РСА; π_k и $\pi_{k\text{max}}$ — степень повышения давления компрессором и его максимальное (критическое) значение; $\omega_{T\text{max}}$ — максимальная угловая скорость ротора ТК; T_0 — температура внешней среды; p_0 — атмосферное давление; $\Delta P_{\text{ВО}}$ — гидравлическое сопротивление воздухоочистителя (ВО); k — показатель адиабаты для воздуха; $\eta_{\text{к.ад}}$ — адиабатный КПД компрессора.

Полученная система уравнений (2) позволяет согласовать работу управляемой системы наддува и дизеля ББМ. Отличительной особенностью этой системы уравнений является учет всех возможных режимов работы управляемой системы наддува, оборудованной ТК с РСА.

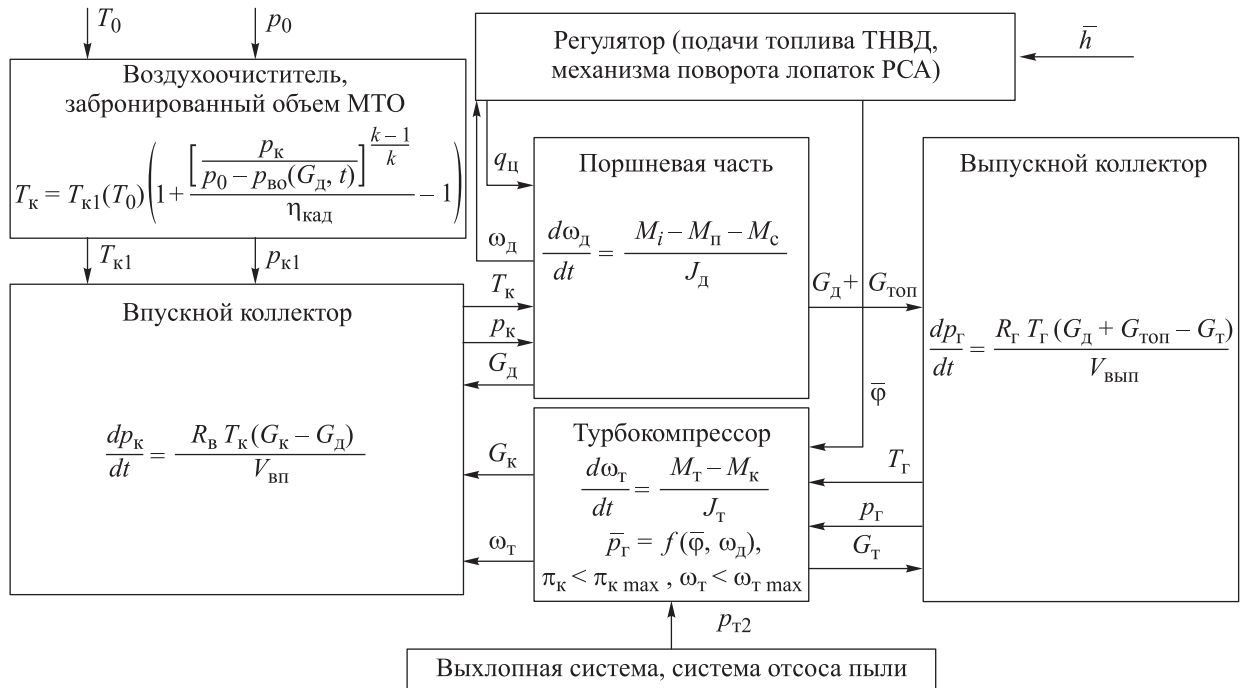


Рис. 1. Структура ММ и функциональные связи блоков модели дизеля ББМ, оборудованного ТК с РСА

Модель (2), структура и функциональные связи которой показаны на рис. 1, позволяет рассчитывать изменение во времени основных показателей дизеля ББМ с ГТН при установившихся и неустойчивых режимах, с учетом условий размещения дизеля в МТО.

Первое отличие разработанной ММ от ранее известных моделей отражено в блоке «Воздухоочиститель, забронированный объем МТО». Суть заключается в учете изменения температуры и давления воздуха на входе в компрессор из-за размещения дизеля в МТО.

Подогрев воздуха, проходящего через ВО и внутренний объем МТО от T_0 до $T_{к1}$, как и падение давления воздуха от p_0 (атмосферного давления) до $p_{к1}$, существенно ухудшает характеристики ТК [13]. Оценка влияния этих факторов проведена на основании опытных данных, полученных в нашей стране при испытаниях танков с дизелями пробегом в разных климатических зонах и периодах года.

Гидравлическое сопротивление ВО, состоящего из двух ступеней очистки, определяется выражением

$$\Delta P_{ВО} = \Delta P_{ц} + \sum_{i=1}^n \Delta P_i,$$

где $\Delta P_{ц}$ — гидравлическое сопротивление циклонного аппарата; ΔP_i — сопротивление i -й кассеты; n — количество кассет в ВО.

По данным испытаний и эмпирическим зависимостям [22] выполнены расчеты сопротивления $\Delta P_{ВО}$, оказываемого двухступенчатым ВО, в зависимости от расхода воздуха через него и запыленности воздуха. Расчет проведен для диапазона запыленности воздуха 2...7 г/кг (пыли к воздуху) и трех режимов работы дизеля, т. е. при расходе воздуха $G_d = 0,2; 0,9$ и $1,4$ кг/с.

Для режима фильтрации ВО при запыленности воздуха 2 г пыли на 1 кг воздуха гидравлическое сопротивление ВО определяется эмпирической зависимостью

$$\Delta P_{ВО} = 3145,6G_d^2 + 1057,56G_d + 0,017t^2 + 15,87t + 108,51G_d t + 635,1.$$

Давление перед входом в компрессор

$$p_{к1} = p_0 - \Delta P_{ВО}.$$

Температура воздуха на входе в компрессор растет по мере повышения температуры внешней среды в соответствии с эмпирической зависимостью, определенной при исследовании теплонапряженности МТО танка Т-72, в диапазоне температуры внешней среды 283...323 К. Температура воздуха после прохождения через ВО и объем МТО определяется выражением

$$T_{к1}(T_0) = 1,3727T_0 - 99,228, \text{ К.} \quad (3)$$

Выражение (3) можно использовать для ББМ, компоновка МТО которых аналогична танку Т-72 (Т-90).

Вторым отличием предложенной ММ от ранее известных моделей является учет РСА в составе агрегата наддува с помощью зависимости $\bar{p}_r = f(\bar{\varphi}, \omega_d)$. Эта зависимость определена на основании газодинамической функции приведенной плотности потока массы газа $q(\lambda)$. Газодинамическую функцию, представляющую собой отношение плотности тока в произвольном сечении к критической плотности тока (в критическом сечении), можно получить путем преобразования уравнения сохранения массы.

Практическим приложением функции плотности потока массы газа $q(\lambda)$ является расчет расхода газа через параметры торможения по выражению

$$G_r = K \mu_p \frac{p_r F_{ca}}{\sqrt{R_r T_r}} q(\lambda),$$

где K — функция показателя изоэнтропы ОГ; μ_p — коэффициент истечения, зависящий от числа Рейнольдса Re ; p_r — статическое давление ОГ перед турбиной; F_{ca} — площадь живого сечения потока (проходного сечения соплового аппарата турбины); T_r — температура газа

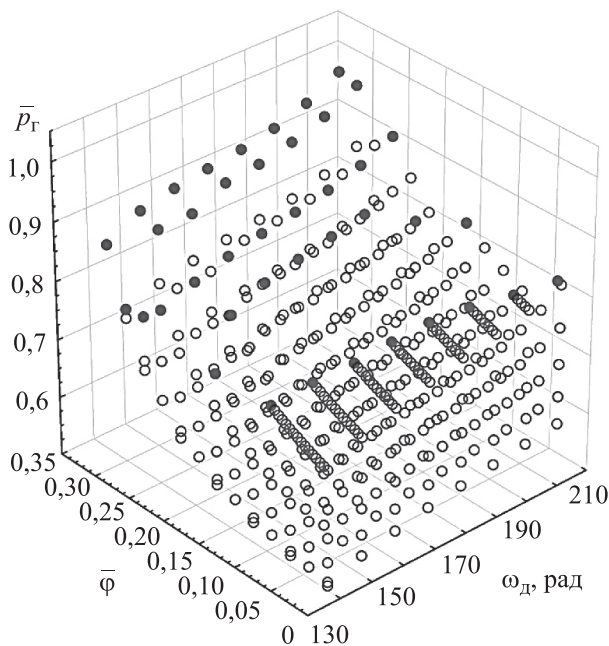


Рис. 2. Зависимость относительного статического давления ОГ перед турбиной \bar{p}_r от относительного угла поворота лопаток РСА $\bar{\varphi}$ и угловой скорости коленчатого вала дизеля ω_d

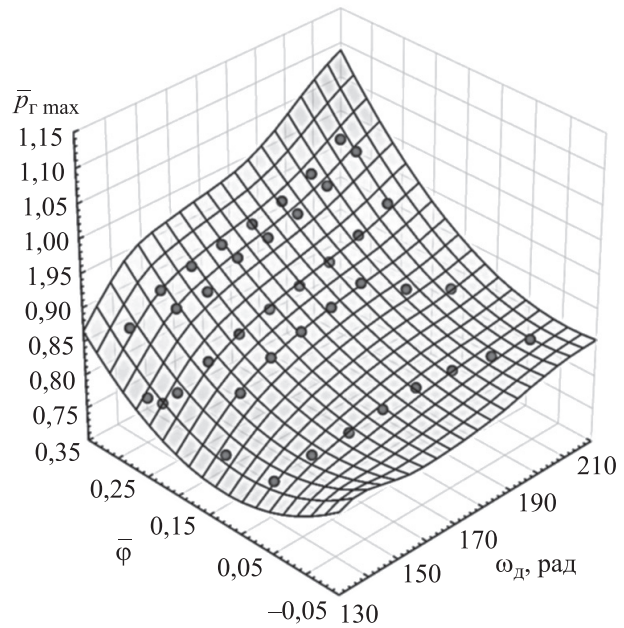


Рис. 3. Зависимость максимального статического давления ОГ перед турбиной $\bar{p}_{r \max}$ от относительного угла поворота лопаток РСА $\bar{\varphi}$ и угловой скорости коленчатого вала дизеля ω_d

в потоке (в параметрах торможения перед турбиной).

С помощью разработанной программы для расчета статического давления ОГ дизеля на входе в РСА турбины ТК с изменяемой геометрией, а также программ для вычисления характеристик дизеля, оборудованного ТК с РСА, получен массив данных, описывающих зависимости параметров дизеля от относительного угла поворота лопаток РСА.

Наибольший интерес в этом массиве представляет зависимость относительного статического давления ОГ перед турбиной \bar{p}_r от относительного угла поворота лопаток РСА $\bar{\varphi}$ и угловой скорости коленчатого вала дизеля ω_d , приведенная на рис. 2. Здесь сплошными маркерами выделены предельные значения давления \bar{p}_r , ограниченные явлением помпажа.

Максимальные значения статического давления ОГ перед турбиной соответствуют максимальному значению эффективного крутящего момента дизеля, возможного к получению при регулировании РСА в статических режимах (см. рис. 2, сплошные маркеры).

Поверхность отклика (рис. 3), описывающая зависимость максимального относительного статического давления ОГ перед турбиной $\bar{p}_{r \max}$ от относительного угла поворота лопаток

РСА $\bar{\varphi}$ и угловой скорости коленчатого вала дизеля ω_d определяется выражением

$$\bar{p}_{\text{гmax}} = 0,2468 + 0,0058\omega_d - 0,00001455\omega_d^2 - \\ - 0,6212\bar{\varphi} + 1,4962\bar{\varphi}^2 + 0,0031\bar{\varphi}\omega_d.$$

Входящие в систему уравнений параметры: индикаторный крутящий момент дизеля M_i , массовый расход топлива $G_{\text{топ}}$, массовый расход газа через турбину G_T , коэффициент избытка воздуха α , массовый расход воздуха через поршневую часть дизеля G_d , плотность наддувочного воздуха ρ , температура наддувочного воздуха T_k , момент сопротивления нагрузочного устройства M_{ci} при угловой скорости ω_{di} , среднее давление внутренних потерь в дизеле $p_{\text{п}}$, средняя скорость поршня $v_{\text{п.ср}}$ и момент внутренних потерь в дизеле $M_{\text{п}}$ получены по известным фундаментальным зависимостям [23, 24].

По эмпирическим зависимостям определены следующие параметры: цикловая подача топлива $q_{\text{ц}}$, индикаторный КПД дизеля η_i , коэффициент наполнения η_v , адиабатический КПД компрессора $\eta_{\text{ад}}$, расход воздуха через компрессор G_k , температура ОГ перед турби-

ной T_T , эффективный КПД турбины η_T и критическая степень повышения давления компрессором $\pi_{k \text{ max}}$.

На основе ММ дизеля, оснащенного ТК с РСА, разработана компьютерная программа для определения разгонных характеристик, средней скорости движения и запаса хода ББМ, оборудованных дизелями с наддувом, регулируемым изменением положения лопаток РСА [25]. Расчеты разгона исследуемого дизеля, проведенные с помощью разработанной программы, показали, что применение в его составе агрегата наддува с РСА позволит сократить время разгона на 7,8...23,0 % при различной нагрузке.

Из наиболее возможных к применению в составе ББМ систем регулируемого наддува, следует выделить систему с перепуском воздуха на вход турбины [19] и систему с подкруткой ротора ТК электромотором [18]. Применение перепуска воздуха от компрессора на вход турбины в режиме торможения, снижает время разгона до 26 %.

Однако этот метод имеет существенный недостаток — его можно использовать только

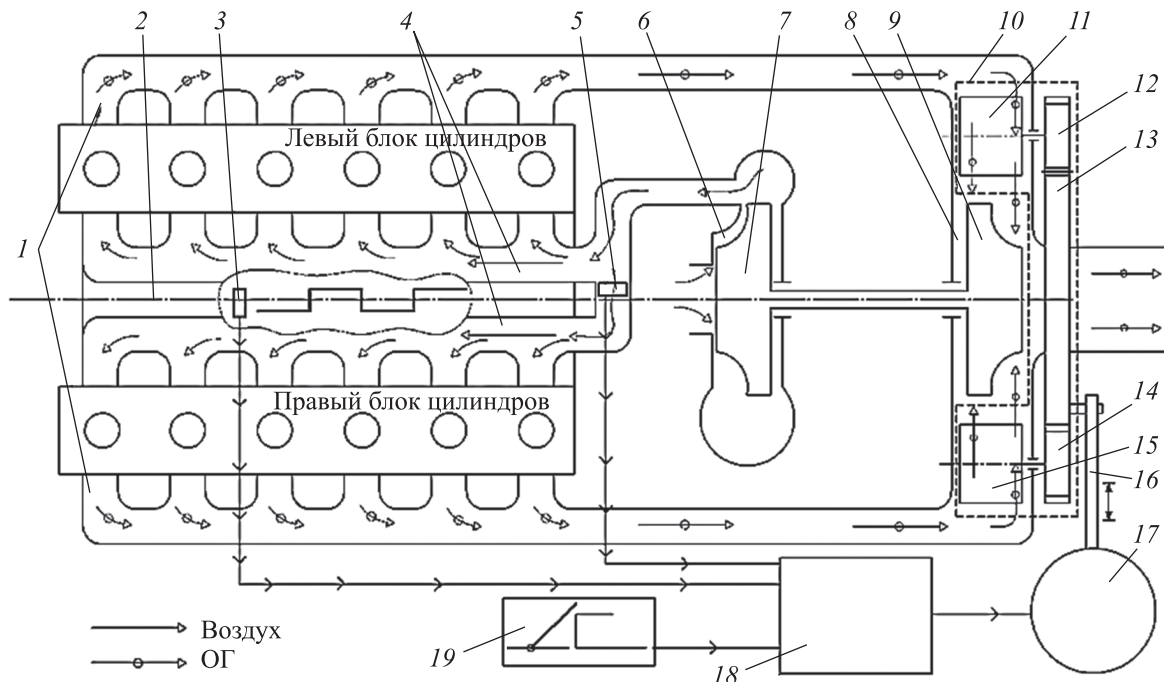


Рис. 4. Схема дизельного двигателя военной гусеничной машины, оборудованного турбокомпрессором с изменяемой геометрией турбины:

1 и 4 — выпускные и впускной коллекторы; 2 — дизельный двигатель; 3 — датчик частоты вращения коленчатого вала; 5 — датчик давления наддувочного воздуха; 6 и 7 — компрессор и его рабочее колесо; 8 и 9 — турбина с изменяемой геометрией и ее рабочее колесо; 10 — РСА; 11 — поворотные лопатки РСА правого блока цилиндров; 12 и 14 — зубчатые секторы привода лопаток РСА правого и левого блока цилиндров; 13 и 16 — поворотное кольцо РСА и рычаг его привода; 15 — лопатки РСА левого блока цилиндров; 17 — шаговый электродвигатель; 18 — электронный блок управления; 19 — датчик положения педали акселератора

в режиме *торможение — разгон*. Если дизель работает на минимальных оборотах коленчатого вала, то указанная система регулирования наддува не работает при трогании ББМ с места.

Применение в качестве источника дополнительной энергии для подкрутки ротора ТК обратимой электрической машины сокращает время разгона до 22 %. Но и этот способ имеет недостатки, затрудняющие его использование в ББМ: высокие пусковые токи, температурная чувствительность электродвигателя, необходимость дополнительного электрического оборудования для преобразования тока, а также аккумуляторных батарей большей емкости (или дополнительной батареи).

Таким образом, при сравнимой эффективности с другими способами регулируемого наддува РСА, примененный в агрегате наддува дизеля ББМ, выигрывает по массогабаритным параметрам и простоте конструкции.

Для возможного применения в производстве (модернизации) ББМ разработано техническое решение, названное дизельным двига-

телем военной гусеничной машины, оборудованном турбокомпрессором с изменяемой геометрией турбины [26] (рис. 4). Оценка подвижности ББМ, проведенная по утвержденной методике [10], показала, что использование разработанной полезной модели позволит с минимальными затратами увеличить среднюю скорость ББМ при прохождении колонного пути на 7 %, а запас хода на 12 %.

Выводы

1. Разработана ММ для определения основных показателей дизеля 12ЧН15/18 с ГТН, управляемым посредством РСА. В отличие от известных моделей, в предложенной ММ учтена специфика применения дизеля в составе силовой установки ББМ, определена зависимость характеристик ТК при изменении положения соплового аппарата турбины.

2. С помощью разработанной ММ проведено исследование основных показателей дизеля 12ЧН15/18, оборудованного ТК с РСА.

Литература

- [1] Степанов В.В., Зайцев Е.Н. Состояние и тенденции развития танковых парков России и стран НАТО до 2025 года. *Известия РАРАН*, 2015, № 4, с. 52–58.
- [2] Степанов В.В. Рейтинги мировых танковых парков: применение методов сравнительного анализа для оценки военно-технического уровня и конкурентноспособности танков на мировом рынке. *Известия РАРАН*, 2012, № 2, с. 24–34.
- [3] Павлов В.В. К оценке тягово-скоростных характеристик быстроходных гусеничных машин. *Вестник МАДИ*, 2019, № 2, с. 50–56.
- [4] Праздников В.И., Парфенов Е.И. Российские танки в начале XXI века. *Стратегическая стабильность*, 2012, № 4, с. 20–26.
- [5] Сосновских Н.А., Мальшев Д.Н., Щипанов А.Н. Научно-технический задел и практическая целесообразность модернизации гусеничных шасси. *Вооружение и экономика*, 2020, № 3, с. 66–70.
- [6] Проговоров А.П., Шабалин Д.В. Анализ методов математического моделирования газодизельного рабочего цикла для определения возможности форсирования танкового дизеля. *Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму*, 2022, № 11–12, с. 105–112.
- [7] Кузнецов А.Г., Харитонов С.В., Рыжов В.А. Улучшение динамических свойств среднеоборотного дизеля при использовании регулируемого турбонаддува. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 11, с. 59–74, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-11-59-74>
- [8] Ахтулов А.Л., Чутков К.А., Агафонов Д.С. Методика оценки влияния характеристик дизельного двигателя на показатели подвижности военной гусеничной машины. *Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова*, 2023, т. 26, № 2, с. 69–75.
- [9] Лазарев Е.А., Помаз А.Н., Салов А.Ю. Новый способ и устройство управления газообменов в дизеле с газотурбинным наддувом. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Машиностроение*, 2013, т. 13, № 1, с. 132–136.
- [10] Макоклюев А.И., Апекунов В.В., Дулатина Л.Г. Метод определения средней скорости движения образцов. *Наука и военная безопасность*, 2020, № 3, с. 36–41.

- [11] Усов О.А. Расчетная оценка оперативной подвижности военных гусеничных машин. *Наука и образование: научное издание*, 2016, № 11. URL: <http://engineering-science.ru/doc/850365.html>
- [12] Сенькин П.А. Методика моделирования движения гусеничной машины с различными уровнями номинальной мощности. *Вестник СибАДИ*, 2016, № 4, с. 77–81.
- [13] Сенькин П.А., Прокопенко Н.И., Смирнов А.М. и др. Расчет оптимальных параметров силовой установки танка с двигателем постоянной мощности. *Омский научный вестник*, 2017, № 6, с. 32–35.
- [14] Харитонов С.В. *Формирование характеристик дизельного двигателя при использовании системы комплексного адаптивного управления*. Дисс. ... канд. тех. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 173 с.
- [15] Боковиков А.Н. *Использование турбокомпрессора с турбиной изменяемой геометрии для повышения экологических и экономических показателей двигателя*. Дисс. ... канд. тех. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. 171 с.
- [16] Кузнецов А.Г., Харитонов С.В., Сапронов Д.П. Применение методов машинного обучения при разработке динамической модели дизельного двигателя. *Двигателестроение*, 2023, № 1, с. 38–50.
- [17] Боковиков А.Н., Кузнецов А.Г. Математическая модель системы воздухообеспечения автомобильного дизеля для полунатурного моделирования его динамических режимов. *Грузовик*, 2009, № 11, с. 30–33.
- [18] Агафонов Д.С., Ахтулов А.Л., Приймак С.В. и др. Математическая модель рабочих процессов дизельного двигателя с комбинированной системой наддува. *Стратегическая стабильность*, 2021, № 1, с. 21–24.
- [19] Шелпаков С.Ю., Ахтулов А.Л., Агафонов Д.С. Математическое моделирование динамических характеристик дизельных двигателей военных гусеничных машин с устройством регулирования наддува. *Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму*, 2021, № 11–12, с. 46–53.
- [20] Кузнецов А.Г., Харитонов С.В., Рыжов В.А. Исследование динамических свойств тепловозного дизеля при использовании регулируемого турбонаддува. *Двигателестроение*, 2022, № 1, с. 76–83.
- [21] Кузнецов А.Г., Харитонов С.В., Латочкин А.А. Математическая модель дизеля, как источника энергии транспортной установки с электрической трансмиссией. *Грузовик*, 2014, № 7, с. 11–14.
- [22] Анисеев В.В., Бузин В.А. Сравнительный анализ существующих типов воздухоочистителей автотракторной техники. *Научно-технический вестник Поволжья*, 2015, № 6, с. 68–70.
- [23] Чайнов Н.Д., ред. *Конструирование и расчет поршневых двигателей*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2018. 536 с.
- [24] Колчин А.И., Демидов В.П. *Расчет автомобильных и тракторных двигателей*. Москва, Высшая школа, 2008. 469 с.
- [25] Юдников Е.А. *Расчет средней скорости и запаса хода гусеничной машины, оборудованной дизельным двигателем с наддувом, управляемым посредством изменения геометрии турбины турбокомпрессора*. Свид-во о рег. прог. для ЭВМ № 2023683849 РФ. Оpubл. 10.11.2023.
- [26] Юдников Е.А., Ахтулов А.Л., Эдигаров В.Р. и др. *Дизельный двигатель военной гусеничной машины, оборудованный турбокомпрессором с изменяемой геометрией турбины*. Патент РФ 212008. Заявл. 10.02.2022, опубл. 01.07.2022.

References

- [1] Stepanov V.V., Zaytsev E.N. Concept and development trends of tank parks in Russia and NATO countries until 2025. *Izvestiya RARAN*, 2015, no. 4, pp. 52–58. (In Russ.).
- [2] Stepanov V.V. Ratings of world tank fleets: application of comparative analysis methods to assess the military-technical level and competitiveness of tanks on the world market. *Izvestiya RARAN*, 2012, no. 2, pp. 24–34. (In Russ.).

- [3] Pavlov V.V. To the evaluation of traction-speed characteristics high-speed tracked vehicles. *Vestnik MADI*, 2019, no. 2, pp. 50–56. (In Russ.).
- [4] Prazdnikov V.I., Parfenov E.I. Russian tanks at the beginning of the XXI century. *Strategicheskaya stabilnost*, 2012, no. 4, pp. 20–26. (In Russ.).
- [5] Sosnovskikh N.A., Malyshev D.N., Shchipanov A.N. Scientific and technical backlog and practical feasibility of caterpillar chassis modernization. *Vooruzhenie i ekonomika* [Armament and Economics], 2020, no. 3, pp. 66–70. (In Russ.).
- [6] Progovorov A.P., Shabalin D.V. Analysis of the methods of mathematical modeling of the gas — diesel work cycle to determine the possibility of forcing a tank diesel. *Voprosy obronnoy tekhniki. Ser. 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Military Engineering. Counter-Terrorism Technical Devices. Issue 16], 2022, no. 11–12, pp. 105–112. (In Russ.).
- [7] Kuznetsov A.G., Kharitonov S.V., Ryzhov V.A. Improving the dynamic properties of a medium-speed diesel engine using variable turbocharging. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2021, no. 11, pp. 59–74, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-11-59-74> (in Russ.).
- [8] Akhtulov A.L., Chutkov K.A., Agafonov D.S. The method of process of formation of the tactical and technical requirements for armored armament and technology at the organization of production. *Vestnik IzhGTU im. M.T. Kalashnikova* [Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova], 2023, vol. 26, no. 2, pp. 69–75. (In Russ.).
- [9] Lazarev E.A., Pomaz A.N., Salov A.Yu. A new method and control device of gas exchange at a supercharged diesel engine. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Mashinostroenie* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry], 2013, vol. 13, no. 1, pp. 132–136. (In Russ.).
- [10] Makoklyuev A.I., Apekunov V.V., Dulatina L.G. Method for determining the average speed of samples of armor materiel and armament. *Nauka i voennaya bezopasnost* [Science and Military Security], 2020, no. 3, pp. 36–41. (In Russ.).
- [11] Usov O.A. The estimated operational movability of military tracked vehicles. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2016, no. 11. URL: <http://engineering-science.ru/doc/850365.html> (in Russ.).
- [12] Senkin P.A. Methods of modeling of the moving the caterpillar machine with power installing the constant power. *Vestnik SibADI* [The Russian Automobile and Highway Industry Journal], 2016, no. 4, pp. 77–81. (In Russ.).
- [13] Senkin P.A., Prokopenko N.I., Smirnov A.M. et al. Calculation of optimum parameters for tank power-package with sustained power engine. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2017, no. 6, pp. 32–35. (In Russ.).
- [14] Kharitonov S.V. *Formirovanie kharakteristik dizelnogo dvigatelya pri ispolzovanii sistemy kompleksnogo adaptivnogo upravleniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Formation of characteristics of a diesel engine at use of system of complex adaptive control. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017. 173 p. (In Russ.).
- [15] Bokovikov A.N. *Ispolzovanie turbokompressora s turbinoy izmenyaemoy geometrii dlya povysheniya ekologicheskikh i ekonomicheskikh pokazateley dvigatelya*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Use of turbocharger with variable geometry turbine to improve the environmental and economic performance of the engine. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011. 171 p. (In Russ.).
- [16] Kuznetsov A.G., Kharitonov S.V., Saprionov D.P. Application of machine learning methods in developing a dynamic diesel engine model. *Dvigatelistroenie* [Engines Construction], 2023, no. 1, pp. 38–50. (In Russ.).
- [17] Bokovikov A.H., Kuznetsov A.G. Mathematical model of Gas Exchange System of automobile diesel for realtime modelling of dynamic operating points. *Gruzovik* [Truck], 2009, no. 11, pp. 30–33. (In Russ.).
- [18] Agafonov D.S., Akhtulov A.L., Priymak S.V. et al. Mathematical model of working processes of a diesel engine with a combined supercharging system. *Strategicheskaya stabilnost*, 2021, no. 1, pp. 21–24. (In Russ.).
- [19] Shelpakov S.Yu., Akhtulov A.L., Agafonov D.S. Mathematical modeling of dynamic characteristics of diesel engines of military tracked vehicles with a boost control device. *Voprosy*

- oboronnoy tekhniki. Ser. 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Military Enginery. Counter-Terrorism Technical Devices. Issue 16], 2021, no. 11–12, pp. 46–53. (In Russ.).
- [20] Kuznetsov A.G., Kharitonov S.V., Ryzhov V.A. Research of the dynamic properties of a diesel locomotive when using variable geometry turbine. *Dvigatelistroenie* [Engines Construction], 2022, no. 1, pp. 76–83. (In Russ.).
- [21] Kuznetsov A.G., Kharitonov S.V., Latochkin A.A. Mathematical model of diesel engine as energy generator for vehicle with electrical transmission. *Gruzovik* [Truck], 2014, no. 7, pp. 11–14. (In Russ.).
- [22] Anikeev V.V., Buzin V.A. Comparative analysis of the existing types of air cleaners automotive vehicles. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya* [Scientific and Technical Volga Region Bulletin], 2015, no. 6, pp. 68–70. (In Russ.).
- [23] Chaynov N.D., ed. *Konstruirovaniye i raschet porshnevnykh dvigateley* [Design and calculation of piston engines]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2018. 536 p. (In Russ.).
- [24] Kolchin A.I., Demidov V.P. *Raschet avtomobilnykh i traktornykh dvigateley* [Calculation of automobile and tractor engines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2008. 469 p. (In Russ.).
- [25] Yudnikov E.A. *Raschet sredney skorosti i zapasa khoda gusenichnoy mashiny, oborudovannoy dizelnym dvigatelem s nadduvom, upravlyаемым posredstvom izmeneniya geometrii turbiny turbokompressora* [Calculation of the average speed and range of a tracked vehicle equipped with a supercharged diesel engine controlled by changing the turbine geometry of the turbocharger turbine.]. Software reg. certificate 2023683849 RU. Publ. 10.11.2023. (In Russ.).
- [26] Yudnikov E.A., Akhtulov A.L., Edigarov V.R. et al. *Dizelnyy dvigatel voennoy gusenichnoy mashiny, oborudovannyy turbokompressorom s izmenyaemoy geometriey turbiny* [Diesel engine of a military tracked vehicle equipped with a turbocharger with variable turbine geometry]. Patent RU 212008. Appl. 10.02.2022, publ. 01.07.2022. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 28.12.2023

Информация об авторе

ЮДНИКОВ Евгений Алексеевич — адъюнкт кафедры двигателей. Военная академия материально-технического обеспечения им. А.В. Хрулева (644098, Омск, Российская Федерация, 14 военный городок, д. 45, e-mail: y89243197745@yandex.ru).

Information about the author

YUDNIKOV Evgeny Alekseevich — Postgraduate, Department of Engines. Branch of the Military Academy of Logistics named after A.V. Khrulev (644098, Omsk, Russian Federation, 14 military town, Bldg. 45, e-mail: y89243197745@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Юдников Е.А. Математическое моделирование дизельного двигателя, оборудованного турбокомпрессором с регулируемым сопловым аппаратом. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 1, с. 90–100, doi: 10.18698/0536-1044-2024-01-90-100

Please cite this article in English as:

Yudnikov E.A. Mathematical modeling of a diesel engine equipped with a turbocharger with an adjustable nozzle. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 1, pp. 90–100, doi: 10.18698/0536-1044-2024-01-90-100