

БЕТЬ С. Г.,
ст. преп. кафедры «Двигатели внутреннего сгорания»
E-mail: atf.dvs@bntu.by

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 15.09.2025

МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОФОРСИРОВАННЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Современные автотракторные дизельные двигатели более 80 % времени эксплуатируются в условиях переменных нагрузок. В связи с возрастающими требованиями экологических норм и необходимости улучшения показателей топливной экономичности особое значение приобретают технологии, улучшающие качество переходных процессов при динамическом изменении нагрузки и оборотов двигателя. Эффективное управление этими процессами позволяет снизить задержки отклика, улучшить наполнение цилиндров воздухом и топливом, а также уменьшить выбросы вредных веществ.

Данный обзор посвящен основным современным методам и технологическим решениям, направленным на оптимизацию работы дизельных двигателей. Рассматриваются такие ключевые направления, как применение двухступенчатого наддува, системы изменения фаз газораспределения (включая цикл Миллера), электрический наддув, рециркуляция отработавших газов (EGR), а также оптимизация систем впрыска топлива и управления воздухом. Особое внимание уделяется влиянию данных технологий на динамические характеристики двигателя, топливную экономичность и снижение выбросов загрязняющих веществ в условиях переходных процессов.

Комплексное применение перечисленных решений позволяет значительно расширить рабочий диапазон двигателя, улучшить его отклик и динамику, а также обеспечить современный уровень экологической безопасности и экономичности.

Ключевые слова: дизельный двигатель, переходные процессы, нагрузка, крутящий момент, выбросы вредных веществ, экономичность, внешние воздействия, внутренние воздействия.

Введение

Условия работы двигателя транспортного средства в городских условиях в основном характеризуются переходными процессами – такими как старт, ускорение и замедление. При этом значительная доля эксплуатации приходится на режимы с изменяющейся нагрузкой и крутящим моментом. При переходных процессах ухудшаются параметры горения, увеличиваются выбросы вредных веществ и снижается экономичность работы двигателя [1].

В условиях ужесточения экологических норм и все более серьезных требований к выбросам вредных веществ основное внимание уделяется оптимизации параметров работы двигателя при переходных процессах [2].

Конструктивные и эксплуатационные факторы, влияющие на качество переходных процессов

Переходные процессы в работе дизельного двигателя

для существенно зависят от множества факторов, которые можно условно разделить на внешние и внутренние воздействия (рис. 1). Внешние факторы связаны с условиями эксплуатации автомобиля – состоянием дорожного покрытия, атмосферными параметрами и метеорологическими изменениями, а внутренние – обусловлены техническим состоянием и конструктивными особенностями самого двигателя и его систем.

К внешним можно отнести следующие типы воздействия:

1. Тип дорожного покрытия.

Поверхность дороги оказывает существенное влияние на устойчивость движения и сопротивление движению автомобиля. Гравийное покрытие имеет более высокое сопротивление качению и меньшую сцепляемость шин с поверхностью, что приводит к повышенной нагрузке на двигатель при разгоне и более сложному переходному процессу. Асфальтобе-

тонное покрытие обеспечивает меньшее сопротивление и более плавное изменение нагрузки, что способствует более быстрым и устойчивым переходным процессам.

2. Сопротивление качению.

Недостаточное давление в шинах увеличивает деформацию и сопротивление качению.

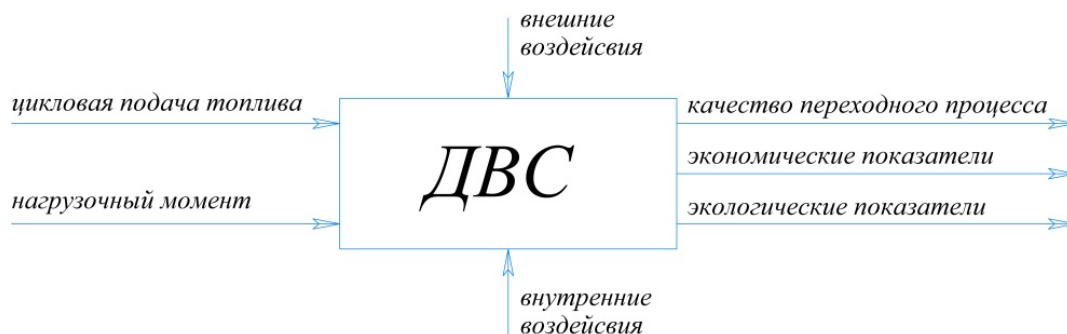


Рисунок 1 – Факторы, влияющие на качество переходных процессов

3. Профиль и качество пути.

Изменения высоты дороги (подъемы и спуски) изменяют нагрузку на двигатель при переходных процессах, так как при подъеме требуется больше мощности, а при спуске – наоборот, нагрузка уменьшается. Неровности дороги вызывают периодические изменения нагрузки и вибрации, которые влияют на стабильность режима работы двигателя и могут усложнять переходные процессы.

4. Атмосферное давление.

Атмосферное давление влияет на плотность воздуха, поступающего в двигатель. При пониженном давлении (на больших высотах) падает масса воздуха, что снижает эффективность сгорания топлива, уменьшает мощность двигателя и влияет на отклик двигателя при переходных процессах – процессы становятся более заторможенными.

5. Температура и влажность окружающей среды.

Температура и влажность воздуха влияют на его плотность и состав. Высокая температура уменьшает плотность воздуха, снижая объем воздуха, поступающего в цилиндры, и тем самым ухудшая эффективность работы двигателя. Влага в воздухе также влияет на процесс сгорания и может изменять динамику переходных процессов за счет изменений состава горючей смеси.

6. Метеорологические условия.

Дождь и снег влияют на сцепление шин с дорогой и, следовательно, на динамику автомобиля, в том числе нагрузки на двигатель. Ветровые порывы могут создавать дополнительные аэродинамические сопротивления или поддерживающие силы, что отражается на изменениях

Это приводит к дополнительной нагрузке на двигатель, замедляет динамику ускорения и ухудшает качество переходных процессов – двигатель работает в более жестких условиях, и отклики становятся менее стабильными.

нагрузки и колебаниях двигателя при переходных процессах. В целом, такие условия ухудшают стабильность переходных процессов.

7. Передача и трансмиссия.

Выбранная передача в трансмиссии напрямую влияет на соотношение оборотов двигателя и колес, а также на величину нагрузки [3]. При низких передачах двигатель работает при высоких оборотах, обеспечивая быстрый отклик, а при высоких передачах двигатель может испытывать повышенную нагрузку и более медленное изменение оборотов. Переключения передач во время движения вызывают резкие изменения в нагрузках и оборотах, усложняя переходные процессы.

К внутренним относятся:

1. Нагрузка двигателя и внутреннее сопротивление.

Внутренние нагрузки двигателя связаны с трением в подшипниках, компрессией газа, сопротивлением поршневых колец и другими механическими сопротивлениями [4]. Чем выше эти внутренние сопротивления, тем медленнее двигатель реагирует на внешние воздействия. Это замедляет переходные процессы и может вызвать нестабильность в динамике отклика.

2. Тепловое состояние двигателя и масла.

Температура двигателя и смазочных материалов влияет на их вязкость и, соответственно, на уровень трения между движущимися частями. При холодном двигателе вязкость масла выше, трение – больше, что замедляет переходные процессы и ухудшает динамические характеристики. По мере прогрева масла, трение уменьшается, и двигатель начинает работать более плавно и эффективно.

3. Гидравлическое трение и инерция.

Гидравлические элементы двигателя (например, гидроэлементы в системах клапанов или трансмиссии) создают дополнительное сопротивление движения. Это трение и инерционность замедляют изменение параметров двигателя при переходных процессах, увеличивают время стабилизации и снижают динамический отклик.

4. Вибрации и балансировка.

Хорошая балансировка деталей двигателя минимизирует вибрации, которые могут передаваться на топливоподающую аппаратуру и другие системы [5]. Если вибрации велики, это приводит к нестабильной работе систем подачи топлива, неравномерному сгоранию и, как следствие, ухудшению качества переходных процессов – возникают колебания параметров и задержки выхода на новый режим.

5. Равномерность циклов.

Равномерное максимальное давление в цилиндрах и стабильность подачи топлива во всех циклах обеспечивают плавное сгорание [6]. Если циклы неравномерны, возникают колебания, ухудшается качество переходных процессов и работа двигателя становится нестабильной.

Анализ данных воздействий позволяет глубже понять причины изменения динамики и стабильности режимов работы, а также подобрать эффективные методы оптимизации переходных процессов для повышения мощности, экономичности и экологичности двигателя.

Методы улучшения качества переходных процессов

В современных дизельных двигателях переходные процессы при изменении нагрузки и оборотов существенно влияют на динамику, экономичность и экологичность работы агрегата. Для повышения их качества применения различных технических решений и систем регулирования становится ключевым направлением развития двигателестроения. Ниже представлены основные методы и технологии, направленные на оптимизацию переходных процессов, повышение мощности, снижение расхода топлива и сокращение выбросов.

1. Применение двухступенчатого наддува.

– двухступенчатый турбокомпрессор применяется для расширения диапазона эффективного наддува, что достигается последовательной работой двух турбин различного размера [7]. Это позволяет:

– увеличить крутящий момент на низких оборотах за счет быстрой раскрутки малой турбины, минимизируя задержку наддува (турбояму);

– на высоких оборотах большая турбина обеспечивает достаточный поток воздуха для поддержания необходимого давления и мощности;

– расширяется рабочий диапазон двигателя благодаря плавному и широкому варьированию давления наддува с минимальными потерями эффективности;

– снижаются выбросы токсичных компонентов (NO_x , CO, CH) за счет улучшенного наполнения цилиндров кислородом и более полного сгорания топлива;

– повышается динамика автомобиля, т. к. двигатель становится более отзывчивым при резком увеличении нагрузки (например, при ускорении).

Влияние на переходные процессы:

– существенное сокращение задержки отклика двигателя на прирост нагрузки, улучшенная приемистость;

– быстрее достигается требуемое давление наддува, что уменьшает временные провалы мощности и крутящего момента.

Количественные показатели улучшений при применении двухступенчатого наддува:

– рост крутящего момента на низких оборотах – до +15–25 % по сравнению с одноступенчатым наддувом;

– повышение максимальной мощности – +5–10 %;

– снижение расхода топлива на 3–5 % благодаря улучшенной эффективности наддува и горения;

– сокращение выбросов NO_x и сажи на 10–15 %.

2. Системы изменения фаз газораспределения (VGT, цикл Миллера).

Изменяемая геометрия турбины (VGT) обеспечивает оптимизацию потока газов через турбину во всем диапазоне оборотов двигателя. В сочетании с двухступенчатым наддувом:

– впускной клапан закрывается позднее (цикл Миллера), уменьшая эффективный объем цилиндра на впуске, снижая тепловые потери и повышая тепловой КПД;

– позднее закрытие клапана позволяет точнее регулировать наполнение цилиндров, улучшая эффективность наддува и снижая расход топлива при малой нагрузке;

– управление фазами газораспределения позволяет регулировать массу воздуха в цилиндрах, снижая давление наддува для уменьшения выбросов NO_x .

Влияние на переходные процессы:

- улучшенный контроль наполнения цилиндров снижает скачки давления и температуры при смене нагрузки;

- повышается плавность переходных процессов и уменьшается задержка реакций двигателя.

Количественные показатели улучшений при применении системы регулирования фаз:

- повышение теплового КПД двигателя на 2–3 %;

- снижение расхода топлива на 2–4 %, особенно при неполной нагрузке;

- сокращение выбросов NO_x на 10–20 %.

3. *Регулирование количества поступающего воздуха.*

Повышение дозировки воздуха улучшает смесеобразование, снижая концентрацию CO и CH в отработавших газах. Однако усложняет систему впуска и требует точного управления.

Влияние на переходные процессы:

- более точное и быстрое регулирование потока воздуха обеспечивает однородность смеси при динамических изменениях нагрузки;

- сокращается время стабилизации параметров смеси и давления наддува.

Количественные показатели улучшений при регулировании количества поступающего воздуха:

- снижение расхода топлива на 1–3 %;

- уменьшение выбросов CO и CH на 10–15 %.

4. *Оптимизация системы впрыска топлива* [17].

Гибкие многоступенчатые стратегии впрыска (предварительный, основной, дополнительный впрыск) обеспечивают оптимальное формирование смеси и управление температурой горения [8].

Влияние на переходные процессы:

- улучшается плавность разгона за счет своевременного и точного дозирования топлива;

- сокращается задержка воспламенения при изменениях нагрузки;

- повышается динамика отклика двигателя.

Количественные показатели улучшений при оптимизации системы впрыска:

- сокращение пиковых выбросов сажи до 50–60 %;

- снижение расхода топлива на 3–5 %.

5. *Время впрыска топлива.*

Оптимальное управление временем впрыска сокращает задержку воспламенения, сглаживает процессы горения и снижает выбросы вредных веществ [8].

Влияние на переходные процессы:

- быстрое приспособление к изменению нагрузки и оборотов двигателя;

- снижение колебаний при переходных процессах.

Количественные показатели улучшений при оптимизации времени впрыска:

- увеличение КПД на 1–2 %;

- снижение выбросов NO_x и частиц на 10–20 %.

6. *Количество подаваемого топлива.*

Точная дозировка топлива позволяет избежать богатых/бедных смесей, снижая расход и экологический вред [8].

Влияние на переходные процессы:

- повышение стабильности работы при резких изменениях нагрузки.

Уменьшение выбросов при увеличении и уменьшении частоты вращения двигателя.

Количественные показатели улучшений при оптимизации количества подаваемого топлива:

- снижение расхода топлива на 3–5 %;

- уменьшение выбросов CO, CH и NO_x на 10–15 %.

7. *Электрический наддув (e-boosting).*

Технология электрического наддува устраняет задержку турбонаддува на низких оборотах, повышая динамику двигателя.

Влияние на переходные процессы:

- улучшение отклика двигателя при переходных процессах;

- повышение устойчивости работы при резких изменениях нагрузки;

- повышение общей динамичности двигателя.

Количественные показатели улучшений при использовании электрического наддува:

- Сокращение времени набора мощности на 20–30 %.

8. *Система рециркуляции отработавших газов (EGR).*

Система EGR снижает температуру сгорания, уменьшая выбросы оксидов азота (NO_x) [9].

Влияние на переходные процессы:

- сглаживает скачки температуры при переходных процессах;

- обеспечивает более стабильное и равномерное сгорание топливовоздушной смеси;

- улучшает устойчивости двигателя при переходных процессах.

Количественные показатели улучшений при применении EGR:

- снижение выбросов NO_x на 20–40 %.

9. *Использование систем непосредственного впрыска топлива (GDI).*

Системы непосредственного впрыска позволяют точнее дозировать топливо и регулировать процесс сгорания.

Влияние на переходные процессы:

- повышение точности впрыска и стабильности работы двигателя при изменениях нагрузки;
- уменьшение расхода топлива и улучшение отклика двигателя.

Количественные показатели улучшений при использовании GDI:

- уменьшение расхода топлива на 3–6 %.

10. Системы управления моментом впрыска и давления топлива.

Управление временем и давлением впрыска обеспечивает оптимальное распыление топлива и ускоряет процесс сгорания [10].

Влияние на переходные процессы:

- улучшение качества процесса сгорания, уменьшение выбросов и повышение мощности;
- повышение эффективности работы при изменении нагрузки;
- снижение выбросов твердых частиц.

Количественные показатели улучшений при оптимизации впрыска и давления:

- увеличение КПД двигателя на 1–2 %.

11. Системы подачи воздуха с изменяемой длиной впускного коллектора.

Изменяемая длина впускного коллектора позволяет оптимизировать поступление воздуха в цилиндры при изменении режима работы двигателя.

Влияние на переходные процессы:

- увеличение крутящего момента на низких и средних оборотах;
- поддержание максимальной мощности на высоких оборотах;
- повышение стабильности работы двигателя при изменении рабочих режимов.

Количественные показатели улучшений при использовании таких систем:

- рост крутящего момента на 10–15 % в диапазоне низких/средних оборотов.

Показатели улучшений по вышеперечисленным методам представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Показатели улучшений

Технология	Влияние на переходные процессы	Улучшение мощности и крутящего момента	Снижение расхода топлива	Снижение выбросов	Дополнительные эффекты
Двухступенчатый наддув	Сокращение задержки отклика, плавный выход на рабочий режим	+(5–10) % мощности; +(15–25) % крутящего момента на низах	–(3–5) %	–(10–15) % NO _x , сажа	Расширение рабочего диапазона, улучшение динамики
Изменение фаз газораспределения и цикл Миллера	Плавность изменения режима работы, уменьшение скачков давления	–	–(2–4) %	–(10–20) % NO _x	Повышение теплового КПД +(2–3) %
Регулирование количества воздуха	Однородность смеси, сокращение времени отклика	–	–(1–3) %	–(10–15) % CO, CH	Улучшение качества смесеобразования
Оптимизация системы впрыска топлива	Плавный переход между режимами, сокращение задержки воспламенения	–	–(3–5) %	Сокращение выбросов сажи до 50–60 %	Повышение динамики и отзывчивости двигателя
Время впрыска топлива	Быстрое приспособление к нагрузкам, сглаживание процессов	–	–	–(10–20) % NO _x и твердых частиц	Повышение КПД на 1–2 %
Количество подаваемого топлива	Стабильность при резких изменениях нагрузки, уменьшение выбросов	–	–(3–5) %	–(10–15) % CO, CH, NO _x	Улучшение топливной экономичности
Электрический наддув (e-boosting)	Устранение турбоямы, быстрое нарастание мощности	–	–	–	Сокращение времени набора мощности на 20–30 %
Рециркуляция отработавших газов (EGR)	Стабильность процесса сгорания, снижение пиковых температур	–	–	–(20–40) % NO _x	Снижение температуры сгорания
Непосредственный впрыск топлива (GDI)	Равномерность сгорания, улучшение отклика	–	–(3–6) %	Снижение выбросов твердых частиц	Повышение эффективности сгорания

Окончание таблицы 1

Управление давлением и моментом впрыска	Улучшение распыла топлива, более быстрый отклик	–	–	Снижение выбросов твердых частиц	Повышение КПД на 1–2 %
Изменяемая длина впускного коллектора	Оптимизация крутящего момента при смене режимов	+(10–15) % крутящего момента на низких оборотах	–	–	Поддержание максимальной мощности на высоких оборотах

Заключение

Современные методы и технологические решения в дизельном двигателестроении значительно улучшают качество переходных процессов при изменении нагрузки и оборотов, что способствует повышению динамики, мощности и топливной экономичности, а также снижению выбросов вредных веществ. Внедрение двухступенчатого наддува, систем изменения фаз газораспределения, оптимизации впрыска топлива, электрического наддува, систем рециркуляции газов и непосредственного впрыска позволяет достигать более плавных, стабильных и быстрых переходных режимов работы двигателя. Эти меры не только улучшают экологические показатели за счет снижения NO_x , CO, СН и сажи, но и расширяют диапазон эффективной работы, повышая отклик и динамику автомобиля. В целом, комплексный подход к оптимизации переходных процессов способствует более экономичному, экологичному и надежному функционированию дизельных двигателей, отвечающему современным требованиям к эффективности и экологической безопасности транспортных средств.

Литература

- Вершина, Г. А. Переходные процессы тракторного дизеля с наддувом, особенности его динамических и экономических качеств и обоснование оптимальных параметров системы САРЧ : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / Вершина Георгий Александрович : Харьков. ин-т инж. желез. тран-та им. С. М. Кирова. – Харьков, 1991. – 151 с.
- Правила ЕЭК ООН № 49. Единообразные предписания, касающиеся подлежащих принятию мер по ограничению выбросов загрязняющих газообразных веществ и взвешенных частиц из двигателей с воспламенением от сжатия, предназначенных для использования на транс-

портных средствах, а также выбросов загрязняющих газообразных веществ из двигателей с принудительным зажиганием, работающих на природном газе или сжиженном нефтяном газе и предназначенных для использования на транспортных средствах.

- Зимелев, Г. В. Теория автомобиля / Г. В. Зимелев – 2-е изд., перераб. – М. : Военное издательство министерства обороны СССР, 1959. – 454 с.

- Крутов, В. И. Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания : учебник для студентов вузов обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / В. И. Крутов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1989. – 416 с.

- Попык, К. Г. Динамика автомобильных и тракторных двигателей / К. Г. Попык. – М. : Высш. шк., 1970. – 328 с.

- Двигатели внутреннего сгорания : учебник для вузов : в 3 т. / В. Н. Луканин, И. В. Алексеев, М. Г. Шатров [и др.] ; под ред В. Н. Луканина, М. Г. Шатрова. – 2-е изд., перераб и доп. – М. : Высшая школа, 2005. – Т. 1 : Теория рабочих процессов. – 479 с.

- Патрахальцев, Н. Н. Форсирование двигателей внутреннего сгорания наддувом / Н. Н. Патрахальцев, А. А. Савастенко. – М. : Легион Автodata, 2004. – 176 с.

- Системы управления дизельными двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание. – М. : ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. – 480 с.

- Кухарёнок, Г. М. Улучшение экологических показателей дизеля / Г. М. Кухарёнок, В. И. Березун. – Мн. : БНТУ, 2019. – 149 с.

- Грехов, Л. В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей : учебник для вузов / Л. В. Грехов, Н. А. Иващенко, В. А. Марков. – 2-е изд. – М. : Легион-Автodata, 2005. – 344 с.

BETS Sergey G.,
Senior lecturer, Department “Internal combustion engines”
E-mail: dvs_atf@bntu.by

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Received 15.09.2023

METHODS FOR IMPROVING THE QUALITY OF TRANSIENT PROCESSES IN HIGH-POWERED DIESELS

Modern tractor diesel engines operate under variable load conditions more than 80 % of the time. Due to the increasing demands of environmental standards and the need to improve fuel efficiency, technologies that improve the quality of transients during dynamic changes in engine load and rpm are of particular importance. Effective management of these processes reduces response delays, improves cylinder air and fuel filling, and reduces emissions of harmful substances.

This review is devoted to the main modern methods and technological solutions aimed at optimizing the operation of diesel engines. Key areas such as the use of two-stage boost, valve timing systems (including the Miller cycle), electric boost, exhaust gas recirculation (EGR), as well as optimization of fuel injection and air control systems are being considered. Special attention is paid to the impact of these technologies on the dynamic characteristics of the engine, fuel efficiency and reduction of pollutant emissions during transients.

The integrated application of these solutions makes it possible to significantly expand the operating range of the engine, improve its response and dynamics, as well as ensure a modern level of environmental safety and efficiency.

Keywords: diesel engine, transients, load, torque, emissions of harmful substances, efficiency, external influences, internal influences.

References

1. Vershina, G. A. Transients of a supercharged tractor diesel engine, features of its dynamic and economic qualities and justification of optimal parameters of the SARCH system : dis. ... Candidate of Technical Sciences : 04/05/02 / Vershina Georgiy Alexandrovich : Kharkov. in-t ing. glands. The S. M. Kirov University. – Kharkov, 1991. – 151 p.
2. UNECE Regulation No. 49. Uniform regulations concerning measures to be taken to limit emissions of polluting gaseous substances and suspended particles from compression-ignition engines intended for use in vehicles, as well as emissions of polluting gaseous substances from forced-ignition engines powered by natural gas or liquefied petroleum gas and intended for use on vehicles.
3. Zimelev, G. V. Car theory / G. V. Zimelev – 2nd ed., perab. – M. : Military publishing ministries oboron. USSR, 1959. – 454 p.
4. Krutov, V. I. Automatic regulation and control of the engines in the building: a textbook for students of the University Teaching in the specialties “engines in the building” / C. I. Krutov. – 5th ed. perab. and DOP. – M. : Mechanical engineering, 1989. – 416 p.
5. Popyk, K. G. Dynamics avtemph and tractor wawrabh engine / K. G. Popyk. – M. : Vish. Shk., 1970. – 328 p.
6. Engines in hot water: textbook DLA vuzov : in 3 t. / V. N. Lukanin, I. V. Alexeyev, M. G. Shatrov [etc.]; in line B.N. Lukanina, M. G. Shatrova. – 2nd ed., PE-reab and DOP. – M. : In the extravehicular school, 2005. – T. 1: theory worked by processov. – 479 p.
7. Patrahaltsev, N. N. Force DWI-gattelei in the uvtreno heated over / N. N. Patrahaltsev, A. A. Savastenko. – M. : Legion Of Autodata, 2004. – 176 p.
8. System evaluative controls diesels urgencies DWI-Gat. With a German. First edition. – M. : “Za rulem”, 2004. – 480 p.
9. Kuharenok, G. M. U.S.-Czech indicator diesel / G. M. Kucharenok, V. And. Berezun. – Mn. : BNTU, 2019. – 149 p.
10. Sinov L. V., Ivashchenko N. A., Markov V. A. Heating appliance and system urgencies dieselay: textbook dla vuzov / L. V. Gresov, N. A. Ivashchenko, V. A. Markov. – 2nd ed. – M. : Legion-Autodata, 2005. – 344 p.