

УДК 621.436:536.5

DOI: 10.52531/1682-1696-2026-26-1-77-84

Научная статья

EDN: UCDMXU

СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

**М.Ю. Кильянов, А.В. Елизаров,
В.М. Ломовский, А.В. Лобанов**

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

УНИВЕРСИТЕТ НЕФТИ И ГАЗА

ИМЕНИ И.М. ГУБКИНА, МОСКВА, РФ

Original article

FEATURES OF DIESEL ENGINE OPERATION AT LOW TEMPERATURES

**M.Y. KILYANOV, A.V. ELIZAROV,
V.M. LOMOVSKY, A.V. LOBANOV**

GUBKIN RUSSIAN STATE UNIVERSITY

OF OIL AND GAS (NATIONAL RESEARCH

UNIVERSITY), MOSCOW, RF

В данной статье рассмотрены особенности эксплуатации дизельных двигателей в условиях пониженных температур. Описаны основные способы предотвращения забивания топливных фильтров. Рассмотрены особенности работы топливной системы при низких температурах и приведены существующие способы обеспечения ее работоспособности. С помощью исследований работы топливоподающей техники для дизелей показано, что линия всасывания топливоподкачивающего насоса – наиболее критический участок данной системы. Наиболее результативным и экономически оправданным методом бесперебойного функционирования двигателя в зимних условиях является термическое разрушение кристаллов Н-алканов. Этот процесс осуществляется с использованием специализированных устройств на начальном этапе системы подачи топлива. Разработана методология расчета компонентов топливной системы при низких температурах. Выполненные теоретические исследования показывают, что возможно с высокой надежностью определить минимальную температуру, при которой нормальная подача топлива по линии низкого давления будет обеспечена путем решения системы дифференциальных уравнений в первом приближении.

Ключевые слова: дизельное топливо, температура застывания, температура помутнения, алканы, математическое моделирование

This article discusses the features of diesel engine operation at low temperatures. The main ways to prevent clogging of fuel filters are described. The features of the fuel system operation at low temperatures are considered and the existing methods of ensuring its operability are given. With the help of studies of the operation of fuel supply equipment for diesel engines, it was shown that the suction line of the fuel priming pump is the most critical section of this system. The most effective and cost-effective way of continuous and trouble-free operation of the engine in winter can be considered the thermal destruction of N-alkane crystals, which is carried out with the help of separate devices in the initial section of the engine power supply system. A method for calculating the elements of fuel equipment at low temperatures is proposed. Theoretical calculations have shown that the minimum temperature at which normal fuel supply is provided along the low-pressure line can be determined with a high degree of accuracy by solving a system of differential equations in the first approximation.

KEY WORDS: diesel fuel, pour point, cloud point, alkanes, mathematical modeling

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация техники, оснащенной дизельными двигателями, в зимний период и в Арктической зоне сопряжена с большим расходом топлива и энергозатратам. Это обусловлено тем, что при отрицательных

температурах окружающей среды в дизельном топливе происходит образование кристаллов углеводородов парафинового ряда. При накоплении в узких местах штуцеров и топливопроводов образованные соединения забивают фильтры грубой и тонкой очистки. При этом увеличивается их сопротивление, что в дальнейшем может привести к разрыву бумажного элемента и работе дизеля на грязном топливе. В результате происходит быстрый выход из строя топливного насоса и форсунок, от которых зависит работоспособность

© М.Ю. Кильянов, А.В. Елизаров, В.М. Ломовский,
А.В. Лобанов

Поступила в редакцию 16.12.2025

двигателя. Кроме того, при отрицательных температурах затрудняется пуск непрогретого дизеля.

Температура окружающего воздуха оказывает существенное влияние на протекание физических процессов, связанных с кристаллизацией углеводородов алканового ряда, конденсацией и растворением воды в топливе; на мощностные, энергетические и экологические характеристики двигателя, надежность и долговечность работы топливной аппаратуры и самого двигателя. При наличии техники с дизельными моторами в особенно больших количествах, работающих в зимних условиях, необходимо повышать надежность данных машин из-за удаленности от пунктов поставок и трудностей доставки запасных частей.

Опыт показал, что надежность техники значительно зависит от климатических условий. Это особенно очевидно, когда машины или их отдельные компоненты эксплуатируются в более суровом климате, чем те, для которых они были спроектированы. Исследования [1, 2] показывают, что количество сбоев и степень износа деталей в зимних условиях эксплуатации увеличиваются в 3–5 раз по сравнению с работой при положительных температурах [9]. Поддержание оптимальной температуры двигателя зимой представляет собой сложную задачу: снижение температуры охлаждающей жидкости приводит к понижению температуры топливно-воздушной смеси, что затрудняет ее самовоспламенение. Например, когда температура охлаждающей жидкости падает с 85 до 45 °С, эффективность дизеля снижается на 5–6%, а износ цилиндра возрастает в четыре раза.

Во время зимнего периода, когда температура окружающего воздуха колеблется от -20 до -37 °С, температура воздуха во впускном коллекторе может снизиться с 21 до -31 °С. Это приводит к увеличению времени задержки самовоспламенения, что, в свою очередь, вызывает неполное сгорание топлива и, как следствие, ухудшение работы двигателя и рост удельного расхода топлива.

С понижением температуры окружающей среды одновременно происходит увеличение отказов двигателей, механизмов, применяющих в работе дизельное топливо. На практике до 50% отказов двигателей является следствием нарушения работы топливоподающей системы. Некоторые системы, расположенные в непосредственной близости от двигателя, нагреваются от него, другие агрегаты, находящиеся на достаточном удаленном расстоянии, охлаждаются воздухом.

Низкие температуры воздуха и соответствующее охлаждение компонентов и материалов затрудняют запуск двигателя, что приводит к ухудшению стабильности работы отдельных систем. Проблемы при запуске могут возникать из-за сложности достижения необходимой частоты вращения коленчатого вала, а также из-за ухудшения условий для образования смеси и ее воспламенения. Основные факторы, создающие труд-

М.Ю. КИЛЬЯНОВ, А.В. ЕЛИЗАРОВ,
В.М. ЛОМОВСКИЙ, А.В. ЛОБАНОВ
СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОЙ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

ности при запуске холодных дизельных двигателей в условиях низких температур, включают [5]:

- увеличение момента сопротивления прокручиванию коленчатого вала двигателя из-за повышенной вязкости масла;
- снижение температуры воздуха, который поступает в двигатель, что в дальнейшем является причиной понижения температуры топливной смеси в конце сжатия. Пуск дизеля реализуется при температуре в конце такта сжатия в камере сгорания 350–400 °С. При частоте вращения коленчатого вала двигателя 190 мин⁻¹ и температуре окружающего воздуха 0 °С впрыск топлива снижает температуру смеси в конце такта сжатия на 130 °С;
- утечка воздуха через зазоры в сопряжениях деталей ЦПГ вследствие медленного прокручивания коленчатого вала;
- увеличение вязкости топлива при образовании алканов и ухудшение распыла его форсунками;
- пониженная температура в момент завершения цикла сжатия, возникающая вследствие активного тепловыделения, приводит к уменьшению среднего индикаторного давления, создаваемого двигателем;
- снижение производительности аккумуляторных батарей.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для эффективного запуска двигателя критически важно, чтобы температура воздуха в конце сжатия превышала температуру самовоспламенения топлива. Самовоспламенение дизельного топлива в распыленном виде происходит при 400 °С, в то время как температура воздуха в конце сжатия может достигать 700 °С (при стандартных условиях работы). Чтобы достичь такой температуры, воздух необходимо сжать до давления $(300–350) \times 10^4$ Н/м². Однако в зимний период даже при высоком давлении не всегда удастся нагреть воздух до нужной температуры к концу сжатия. Это связано с несколькими факторами.

Во-первых, в цилиндры двигателя поступает сильно охлажденный воздух из внешней среды, который во время впуска не успевает нагреться от холодных стенок цилиндров.

Во-вторых, при сжатии воздуха на небольшой частоте вращения коленчатого вала наблюдается значительная утечка воздуха через щели между поршнем и цилиндрической гильзой. При запуске холодного двигателя усиливается теплообмен между воздухом и стенками цилиндра, из-за чего температура сжимаемого воздуха растет медленнее, что ухудшает условия самовоспламенения топлива. Вдобавок, подача холодного топлива в камеру сгорания приводит к увеличению поверхностного натяжения и кинематической вязкости капель, что, в свою очередь, вызывает рост массы и кинетической энергии каждой капли. Это приводит к снижению общей силы аэродинамического торможения.

ния. Таким образом, уменьшается интенсивность тор-можения капле, и лишь малая часть циклической по-дачи оказывается в объеме факела. Все это замедляет процесс прогрева, испарения и воспламенения топли-ва, что, в свою очередь, нарушает процесс горения и увеличивает жесткость работы двигателя. Кроме того, запуск автомобиля в холодное время года усложняет-ся, так как температура самовоспламенения дизельно-го топлива увеличивается при снижении давления в камере сгорания. Так, при давлении 30 МПа темпе-ратура самовоспламенения составляет 200 °С, тогда как при 1 МПа она достигает 400 °С.

Температура застывания и вязкость дизельного топлива оказывают значительное воздействие на про-цесс запуска и надежность работы двигателей в зим-ний период. Эти характеристики влияют на эффек-тивность подачи топлива насосом высокого давления, а также на качество его распыления форсунками и образование смеси внутри цилиндра. При пониже-нии температуры наблюдается увеличение вязкости дизельного топлива, и с течением времени кристал-лизация парафинов приводит к его помутнению, а в некоторых случаях к замерзанию, что нарушает его текучесть. Кристаллы углеводородов, которые выпа-дают из жидкости, могут забить топливные фильтры и трубы, в результате чего происходит первичное на-рушение подачи топлива, которое может закончиться ее полным прекращением.

Факторы, которые влияют на процесс воспламене-ния и горение смеси при запуске в зимних условиях, можно разделить на те, которые можно контролиро-вать в процессе эксплуатации, и конструктивные, на которые невозможно воздействовать.

При низких температурах ухудшается пропуск-ная способность фильтров вследствие забивания их образованиями парафинов и кристаллами льда. При прогреве топливных фильтров данные факторы устраи-ваются.

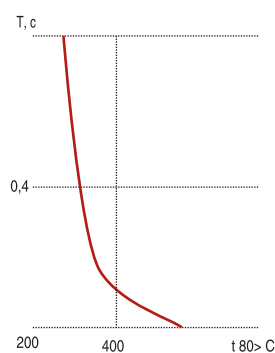


РИС. 1.

Замедление (по времени T) воспламенения дизельного топлива в зависимости от температуры сжатого воз-духа $t_{\text{воз}}$

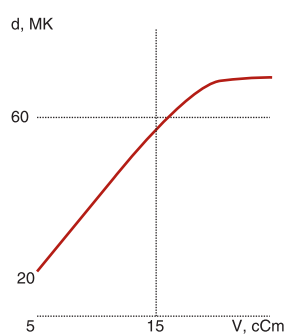


РИС. 2.

Влияние вязкости дизель-ного топлива на средний диаметр $d_{\text{ср}}$ капель

При этом условия смесеобразования в дизельном двигателе имеют более сложный механизм по сравне-нию с карбюраторным. Скорость образования рабо-чей смеси в дизельном двигателе зависит от различных причин, таких как температура и плотность воздуха в камере сгорания, испаряемость топлива, качество рас-пыливания топлива при впрыске.

Температура в такте сжатия характеризуется тем-пературой в конце такта впуска (рис. 1), для этого не-обходим предварительный разогрев воздуха, который поступает в цилиндры при запуске холодного дизель-ного двигателя [5].

В дизельном двигателе скорость смесеобразования зависит от скорости испарения топлива, которая, в свою очередь, связана с фракционным составом, вяз-костью топлива и его поверхностным натяжением. При возрастании вязкости на низких температурах ухудшается прокачиваемость топлива к форсункам, что отрицательно сказывается на качестве распыления в цилиндрах двигателя (рис. 2) [6].

Степень распыливания топлива влияет на скорость испарения (рис. 3). При понижении диаметра капель их число и общая поверхность, с которой происходит испарение, стремительно увеличиваются.

При задержке воспламенения рабочей смеси силь-ное влияние проявляет цетановое число дизельного топлива. При этом эффективность пусковых свойств дизельного топлива повышается при значении це-танового числа до 60–65 ед. При работе дизельного двигателя наиболее эффективным оказывается приме-нение топлива с цетановым числом до 55 ед. (рис. 4). Повышение больше указанного значения приводит к небольшому сокращению индукционного периода.

Увеличение цетанового числа топлива связано с увеличением количества нормальных углеводородов алканового ряда, выпадающих в виде кристаллов при пониженных температурах. При этом снижается про-качиваемость топлива к форсункам двигателя.

Протяженность периода задержки воспламенения имеет большое значение при пониженных температу-рах, затягивается процесс сгорания, неполное сгорание приводит к увеличению выброса токсических веществ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В таблице 1 приводятся данные о влиянии вязко-сти дизельного топлива на его удельный расход и дым-ности отработавших газов, являющихся результатом ухудшения испарения топлива и уменьшения полноты сгорания.

Крупные капли топлива, не успевая полностью ис-париться в камере сгорания, воспламеняются с замет-ным запаздыванием и медленно продолжают гореть во время фазы расширения. Жидкое топливо, которое догорает на стенках камеры сгорания и дне поршня, образует углеродные отложения; форсунки также по-крываются нагаром. Эти процессы ухудшают тепло-

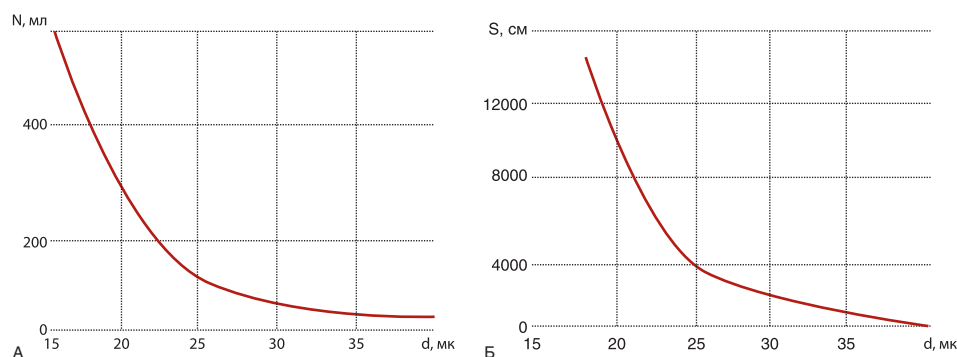


РИС. 3.

Зависимость количества капель N в струе (А) и поверхности испарения S_i (Б) 1 мл распыленного топлива от диаметра капель d_k

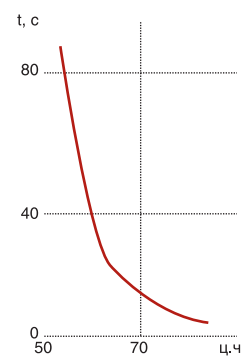


РИС. 4.

Влияние цетанового числа (Ц. Ч.) топлива на время пуска двигателя τ

обмен между перегретыми компонентами двигателя и охлаждающей жидкостью, что негативно сказывается на процессе смешивания топлива. Для успешного запуска холодного дизеля необходимо обеспечить тонкое распыление топлива, что возможно при кинематической вязкости, не превышающей 20 сСт для двигателей со средними оборотами.

Негативные явления в работе двигателей в зимних условиях являются следствием изменения эксплуатационных и физических свойств топлива. Для обеспечения экономичной и надежной работы дизельного двигателя, топливо должно соответствовать определенным требованиям [3, 8]:

- прокачиваться лучшим образом для бесперебойного действия ТНВД (иметь оптимальные вязкость, низкотемпературные свойства, не содержать воды и механических примесей);
- иметь хорошее смесеобразование, как следствие, нужна оптимальная вязкость и фракционный состав;
- полнота сгорания, без образования сажистых веществ, для “мягкой” работы двигателя;
- без повышенного нагарообразования на объектах, закоксовывания форсунки и зависания иглы распылителя;
- иметь хорошие низкотемпературные свойства для работы двигателя при пониженных температурах (необходимо определить температуры помутнения, начала кристаллизации, застывания).

Когда температура воздуха колеблется от -20 до -30°C , рекомендуется добавлять к зимнему дизельному топливу 10% керосина. При температурах от минус 30 до минус 35°C эту долю можно увеличить до 25% осветительного керосина. Известно, что добавление 25% осветительного керосина позволяет понизить температуру застывания на $8-12^\circ\text{C}$. В некоторых заводских рекомендациях упоминается, что превышение 30% керосина в дизельном топливе недопустимо, поскольку это может вызвать проблемы с запуском и ухудшить работу двигателя. Это особенно касается

тракторного керосина. Важно отметить, что вязкость смеси с керосином уменьшается сильнее при низких температурах и меньше – при высоких. При нагреве дизельного топлива от 0 до 80°C его вязкость снижается на 25–30%, в то время как для смесей с керосином в тех же условиях она уменьшается лишь на 15–25%.

Концентрация бензина в дизельном топливе представлена в таблице 2. Тем не менее, для достижения заметного результата необходимо добавлять в топливо значительное количество разбавителя. Это, в свою очередь, вызывает снижение топливной эффективности дизельного мотора, ухудшение его смазочных характеристик и увеличение времени воспламенения. Такое увеличение задержки может привести к эрозийным повреждениям поршней двигателя, особенно при низких температурах.

В зимний период в северных регионах Западной Европы и Канаде наряду с дизельным топливом используется керосин, в который добавляется моторное масло. Тем не менее, добавление тракторного керосина в дизель негативно сказывается на работе технологий. Это приводит к образованию повышенного количества нагара и закоксовыванию форсунок, а также способствует увеличению износа цилиндропоршневой группы. В результате такого смешивания ухудшается функционирование топливной системы и наблюдается рост удельного расхода топлива.

Для использования летнего дизельного топлива в условиях низких температур можно смешивать его с авиационным топливом, таким как Т-1. В частности, если добавить 25% топлива Т-1, температура застывания летнего дизельного топлива снижается на $8-12^\circ\text{C}$, а температура помутнения – на $2-3^\circ\text{C}$ [4].

При смешивании дизельного топлива с высокой температурой застывания и топлива, имеющего низкие показатели как температуры помутнения, так и температуры застывания, наблюдается, что получившиеся смеси не подчиняются аддитивным закономерностям. В частности, значения этих температур, особенно тем-

ТАБЛИЦА 1.

Влияние вязкости дизельного топлива на его удельный расход

Кинематическая вязкость ν , сСт	7	9	15	16	40	49	65
Удельный расход топлива, g_e , г/кВт ч	332	334	338	348	354	428	446
Дымность, условные единицы	77	79	82	—	85,6	95	98

ТАБЛИЦА 2.

Изменение низкотемпературных свойств дизельного топлива при добавлении бензина

Свойство	Стандарт BS 2869	Содержание бензина, %			
Температура, К (°C)		0	10	20	50
помутнения	—	270 (-3)	267 (-6)	265 (-8)	259 (-14)
CFPP	258 (-15)	263 (-10)	258 (-15)	254 (-19)	245 (-28)
вспышки	329 (56)	349 (76)	273 (0)	253 (-20)	229 (-44)
Вязкость, сСт при 313 К (40°C)	2,5...5,0	3,38	2,57	1,84	0,98
Плотность, кг/м³, при 288 К (15°C)	835...865	850	840	829	799

пература начала помутнения, смещаются в сторону вещества с высокой температурой застывания. Для того, чтобы значительно снизить температуры помутнения и застывания дизельного топлива, требуется добавление значительного количества компонента с низкой температурой застывания, которое может достигать 80%.

Смешивание зимних и летних сортов дизельного топлива крайне нежелательно в эксплуатации, так как это существенно ухудшает их эксплуатационные характеристики. Проблема заключается не только в высоких температурах застывания и помутнения, но и в значительном увеличении вязкости при низких температурах. Топливо, полученное в результате смешивания, становится непригодным для использования при температурах ниже -5 °C, даже если в смеси присутствует достаточное количество зимнего дизельного топлива. Например, если смешать летнее дизельное топливо с температурой помутнения -9 °C и зимнее с температурой помутнения -31 °C, то температура помутнения получившейся смеси может возрасти до -6...-8 °C. Это может вызвать проблемы в работе двигателя и снизить его надежность в холодное время года. Поэтому крайне важно тщательно контролировать качество используемого дизельного топлива и избегать его смешивания с различными сортами.

Одним из многообещающих методов улучшения низкотемпературных характеристик дизельного топлива является использование депрессорных присадок. Эти добавки предназначены для понижения температуры застывания (ТЗ) и предельной температуры фильтруемости (ПТФ) дизельного топлива. Основное их применение происходит на нефтеперерабатывающих заводах при производстве стандартных видов топлива, однако, такие добавки могут быть исполь-

зованы конечными пользователями для улучшения низкотемпературных свойств доступного им топлива. Этот способ более безопасен в сравнении с разбавлением топлива керосином или бензином. Важно отметить, что депрессоры не влияют на температуру помутнения (Тп), регламентированную стандартами. Это означает, что они не предотвращают образование кристаллов парафинов, а лишь ограничивают их рост. При длительном хранении топлива мелкие кристаллы оседают, образуя два слоя: верхний – прозрачный, а нижний – мутный, насыщенный парафинами. Добавление депрессоров не способно остановить процесс расслоения топлива [7].

После проведения многочисленных испытаний, показавших эффективность топлива с депрессорными присадками при низких температурах, было установлено, что ключевыми показателями для их использования являются не температура помутнения, а такие характеристики, как температура текучести, прокачиваемости и предельная температура фильтруемости. Это открытие привело к активному развитию исследований по созданию новых депрессорных добавок для дизельного топлива.

Значимость задачи повышения низкотемпературных свойств дизельного топлива становится все более очевидной из-за разнообразия климатических зон, отличающихся изменениями температуры не только в течение года, месяца, но и времени суток.

Температура окружающей среды представляет собой случайную величину, которая колеблется в значительных пределах во времени и пространстве. При разработке методов, ориентированных на повышение низкотемпературных характеристик топлива, необходимо принимать во внимание изменения температуры

не только в течение месяца или сезона, но и в течение суток.

Одним из ключевых параметров климата, важным для эксплуатации машин, является продолжительность холодного сезона. На большей части территории стран СНГ этот период занимает значительное время. В северных районах азиатской части страны дни с отрицательной температурой представлены примерно в 65–70% от общего времени года, тогда как на севере европейской части – 45–50%. С продвижением на юг продолжительность холодного периода уменьшается: в некоторых районах средней Волги и юга Урала насчитывается около 140–150 дней, а в некоторых местах Средней Азии, на Кавказе и вдоль черноморского побережья этот показатель может снижаться до 10–12 дней.

Одной из самых сложных задач является запуск и последующий прогрев двигателя. Например, в условиях сильного холода время, необходимое для термической подготовки, увеличивается в 12 раз по сравнению с летним периодом. В результате эксплуатационные расходы в это время возрастают в 16 раз.

С понижением температуры воздуха снижается эффективность работы и производительность техники. Особенно актуальной проблема запуска двигателей в зимний период становится при отсутствии гаражного хранения автомобилей. Запуск двигателей зимой требует значительных временных и трудовых затрат, а в случае неисправности системы запуска это может привести к простоям машин или тракторов.

Для минимизации влияния низких температур на работу двигателей можно модернизировать существующие транспортные средства, оснастив их современными, высокоэффективными системами запуска, а также дополнительными помощниками, облегчая процесс их пуска в холодное время года.

Существует множество методов и устройств, разработанных для упрощения процесса запуска холодных двигателей. Большинство из них основано на принципе разогрева двигателей. Применение разогрева для уменьшения времени, необходимого для запуска и достижения рабочей температуры, целесообразно даже при незначительном снижении температуры окружающей среды.

Выбор методов и устройств для упрощения пуска двигателя зависит от его конструктивных особенностей, экономических условий и среды эксплуатации. Средства, облегчающие запуск, можно разделить на те, что действуют до начала пуска, и те, которые активно функционируют в момент запуска. К устройствам, которые действуют непосредственно во время пуска, относятся те, которые изменяют параметры различных систем двигателя, а также устройства, способствующие улучшению условий воспламенения топлива (средства для облегчения воспламенения).

Средства, используемые для облегчения пуска двигателя перед его запуском, могут быть как инди-

видуальными, так и групповыми. Групповые средства подразделяются на стационарные и передвижные. В практике предпускового разогрева двигателей существуют различные методы, отличающиеся по способам генерации и доставки тепла, типу и принципу циркуляции теплоносителя, а также по видам потребляемой энергии. Кроме того, они разнообразны в применяемых методах нагрева, которые могут быть как прямыми, так и косвенными.

Перед запуском двигателя осуществляется процесс его предварительного разогрева, при котором тепло поступает в системы охлаждения, к картерному маслу, в систему питания и аккумулятор – либо к одному, либо к нескольким из этих элементов одновременно. В случае косвенного нагрева в качестве теплоносителя могут быть использованы жидкости, пар, воздух или их сочетания. Прямой метод разогрева двигателя и его компонентов перед запуском является более предпочтительным. Он может быть реализован с помощью электрической энергии, тепла, выделяющегося при сгорании топлива (в газообразном, жидком или твердом состоянии), а также через механическое сжатие жидкости.

Одним из наиболее действенных методов упрощения запуска дизельных двигателей является применение легковоспламеняющихся жидкостей, которые, как правило, представляют собой смеси легкокипящих углеводородов. Этиловый эфир, выступающий ключевым компонентом большинства таких средств, обладает более низкой температурой самовоспламенения по сравнению с дизельным топливом при нормальном атмосферном давлении. Этиловый эфир начинает окисляться при температуре в диапазоне 463–493 К, что значительно способствует снижению температуры, необходимой для запуска силовых установок. Однако, когда чистый эфир попадает в цилиндры, возникает резкое нарастание давления, что увеличивает жесткость работы двигателя. Чтобы устранить эту проблему, в состав пусковых жидкостей добавляют масла для смазывания элементов цилиндро-поршневой группы, а также амины, нитраты и низкокипящие парафиновые углеводороды. Обычно содержание эфира в таких жидкостях составляет 60–70%.

Подача пусковой жидкости в моторные цилиндры может выполняться через топливную систему совместно с основным горючим, однако, этот метод экономически невыгоден из-за значительных затрат пусковой жидкости. Более оптимальным вариантом считается распыление пусковой жидкости во впускном трубопроводе с использованием специализированных устройств. В этом случае создается смесь пусковой жидкости с воздухом, которая затем попадает в цилиндры двигателя, где сжимается. В результате сжатия и вследствие образования продуктов предварительного окисления температура повышается. Также для облегчения запуска двигателей применяют впрыск жидкости с низкой температурой воспламене-

ния. Разработано множество различных устройств для впрыска жидкостей в цилиндры двигателей, каждая из которых имеет свои конструктивные особенности.

Для упрощения запуска предкамерных дизелей, имеющих низкую степень сжатия и недостаточную температуру для воспламенения топлива в окончательной стадии сжатия, используются электрические свечи накаливания двух типов: открытые (с открытой спиралью) и закрытые (штифтовые). Установка свечей производится в камере сгорания так, чтобы нагревательный элемент мог инициировать воспламенение распыленного топлива. Для этого необходимо, чтобы теоретический конус распыла топлива касался нагревательного элемента, который выступает в камере сгорания.

Применение свечей подогрева способствует снижению предельной температуры запуска дизельного двигателя примерно на 5 К. Тем не менее, при понижении температуры их эффективность уменьшается, что требует увеличения мощности свечей. Рекомендуется применять свечи подогрева для упрощения запуска дизелей с нераздельной камерой сгорания при температурах около 263 К, особенно когда они сочетаются с топливными насосами, способными увеличить подачу топлива в момент пуска.

Электрофакельные подогреватели функционируют по довольно простой схеме. Топливо из основного резервуара поступает в специализированную камеру сгорания, где через форсунку попадает на нагретую спираль. В результате происходит воспламенение, и жидкость, охлаждающая двигатель, начинает нагреваться. Для повышения эффективности прогрева используется дополнительный насос, обеспечивающий циркуляцию охлаждающей жидкости.

Одним из главных преимуществ электрофакельных подогревателей является их способность работать как на дизельном, так и на бензиновом топливе – то есть, на тех же видах топлива, что и у устанавливаемого двигателя. Это делает их универсальными для различных конструкций двигателей, особенно для упрощения запуска многотопливных агрегатов. Такие подогреватели можно применять и после запуска двигателя, когда он работает на холостом ходу. Это ускоряет прогрев, снижает дымность и уменьшает токсичность отработанных газов.

На продолжительность запуска двигателя существенно влияют расположение электрофакела относительно впускных окон в коллекторе и размеры нагревательного элемента. Оптимальные результаты достигаются, когда колпачок подогревателя или штифт теплового элемента с защитной сеткой опущены в коллектор примерно на две трети своей длины, при этом пламя охватывает около одной трети поверхности впускного коллектора.

В настоящее время растет интерес к групповым стационарным устройствам, разработанным для разогрева, которые предназначены для предварительного

подогрева двигателей перед запуском или поддержания их в теплом состоянии на протяжении всего времени хранения. Эти устройства также обеспечивают быстрое достижение рабочих температур сразу после пуска двигателя. Использование электричества для нагрева двигателей обладает рядом преимуществ по сравнению с другими источниками тепла, включая высокую степень надежности, простоту доступа, компактные размеры нагревательных устройств и быстроту приведения в действие.

В результате проведенных сравнительных испытаний двигателей с электронагревательными элементами и без них получены сравнительные характеристики продолжительности пуска, представленные на рис. 5.

Кривая пуска дизеля с электронагревательным элементом имеет плавный характер. При температуре -4°C время запуска составляет 3 сек. и постепенно увеличивается до 10 сек. при -14°C , достигая 24 сек. при -18°C . В отличие от этого, дизельный двигатель, не имеющий электронагревателя, не запускается при -14°C . Дизель, который оснащен нагревателем, не может начать работу при температуре -19°C , что на $7-8^{\circ}\text{C}$ ниже точки застывания дизельного топлива.

Анализ работы существующих машин показывает, что в зимний период хозяйствам необходимо использовать весь автотракторный парк, даже те механизмы, которые не полностью адаптированы для зимней эксплуатации. Реализация дополнительных организационно-технических мероприятий может существенно уменьшить негативное воздействие холода на эксплуатационные условия, а также улучшить показатели работы двигателей и облегчить их обслуживание.

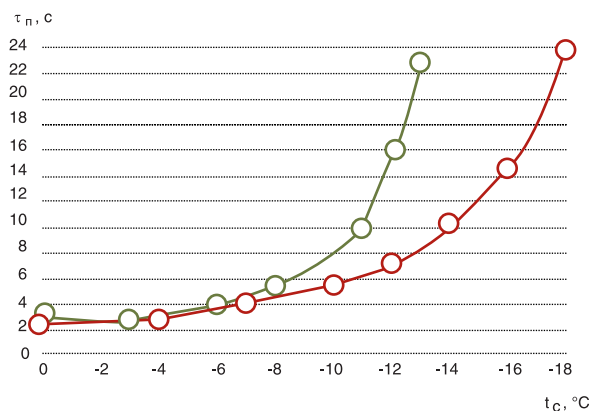


Рис. 5.

Характеристики продолжительности пуска дизеля: 1 – без электронагревательного элемента; 2 – с электронагревательным элементом

ВЫВОДЫ

Опыт работы дизельных двигателей в зимних условиях показывают, что при отрицательных температурах количество отказов возрастает в 3–7 раз, длительность тепловой подготовки увеличивается в 12 раз, а эксплуатационные расходы – в 16 раз. Время, необходимое для прогрева и запуска двигателя, составляет 1–1,5 часа. Учитывая взаимосвязь систем военной техники, проблему зимней эксплуатации следует решать комплексно. Исследования показывают, что наиболее уязвимым участком топливной системы является линия всасывания, которая может забиваться кристаллами Н-алканов при температуре ниже $-8,5^{\circ}\text{C}$. Эффективным способом обеспечения надежности работы дизеля в холодное время являются индивидуальные устройства для теплового разрушения кристаллов в системе питания. Перспективные средства для облегчения запуска включают легковоспламеняющиеся жидкости, депрессорные присадки и электрические подогреватели впускного воздуха для топлива и охлаждающей жидкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власов П.А. Особенности эксплуатации дизельной топливной аппаратуры. М.: Агропромиздат, 1987. 126 с.
2. Головин А.М. Зависимость износа гильзы цилиндров дизеля А-41 от температуры окружающей среды и степени загрузки при пуске-прогреве / Работа дизельных двигателей при низких температурах. Иркутск, 1977. С. 12–16.
3. Иоваева Е.А. Изучение эксплуатационных свойств арктического дизельного топлива г. Якутска // Молодой ученый. М.: 2013. №5 (52). С. 35–40.
4. Картасевич А.Н., Бранцевич В.С., Гордеенко А.В. Повышение эффективности работы системы питания дизеля в зимних условиях / Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей. Тез. докл. конф. СПб., 1995. С. 40–41.
5. Квайт С.М., Менделевич Я.А., Чижков Ю.П. Пусковые качества и системы пуска АТД. М.: Машиностроение, 1990. 256 с.
6. Лавренчук А.И., Кильянов М.Ю., Елизаров А.В. и др. Особенности эксплуатации дизельных двигателей в условиях пониженных температур / Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. № 1 (318). 2025. С. 179–190.
7. Елизаров А.В., Кильянов М.Ю., Лавренчук А.И. и др. Способы улучшения пусковых свойств дизельных двигателей в зимний период эксплуатации / Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. 2022. № 3. С. 164–168.
8. Семенов Н.В. Эксплуатация автомобилей в усло-

М.Ю. КИЛЬЯНОВ, А.В. ЕЛИЗАРОВ,
В.М. ЛОМОВСКИЙ, А.В. ЛОБАНОВ
СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОЙ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

виях низких температур. М.: Транспорт, 1993. 190 с.

9. Суранов Г.И. Уменьшение износа автотракторных двигателей при пуске. М.: Колос, 1982. 141 с.

REFERENCES

1. VLASOV P.A. Features of operation of diesel fuel equipment. Moscow: Agropromizdat, 1987:126. (In Russian).
2. GOLOVIN A.M. Dependence of the wear of the cylinder liner of the A-41 diesel engine on the ambient temperature and the degree of loading during start-up. Operation of diesel engines at low temperatures. Irkutsk, 1977:12–16. (In Russian).
3. IOVLEVA E.L. Study of the operational properties of Arctic diesel fuel in Yakutsk. *Molodoy uchenyy*. Moscow. 2013;5;(52):35–40. (In Russian).
4. KARTASHEVICH A.N., BRANTSEVICH V.S., GORDEENKO A.V. Improving the efficiency of the diesel power supply system in winter conditions. Improving the performance of engines, tractors and automobiles. Tез. dokl. konf. Saint Petersburg, 1995:40–41. (In Russian).
5. KVAIT S.M., MENDELEVICH YA.A., CHIZHKOV YU.P. Starting qualities and systems of automatic start-up. Moscow: Mashinostroenie, 1990:256. (In Russian).
6. LAVRENUCHUK A.I., KILYANOV M.Y., ELIZAROV A.V. Features of operation of diesel engines in conditions of low temperatures. Proceedings of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas. 2025;1;(318):179–190. (In Russian).
7. ELIZAROV A.V., KILYANOV M.Y., LAVRENUCHUK A.I. Ways to improve the starting properties of diesel engines in winter operation. Proceedings of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas. 2022;3:164–168. (In Russian).
8. SEMENOV N.V. Operation of cars at low temperatures. Moscow: Transport, 1993:190. (In Russian).
9. SURANOV G.I. Reducing the wear of tractor engines during start-up. Moscow: Kolos, 1982:141. (In Russian).

Кильянов Михаил Юрьевич,
к.х.н., преподаватель Военного учебного центра РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
✉ e-mail: m.kilyanov@mail.ru

Елизаров Андрей Викторович,
к.т.н., старший преподаватель Военного учебного центра РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
✉ e-mail: andrej.elizarov.80@mail.ru

Ломовский Владислав Михайлович,
начальник цикла – старший преподаватель Военного учебного центра РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
✉ e-mail: greenpeace21@mail.ru

Лобанов Артем Владимирович,
начальник цикла – старший преподаватель Военного учебного центра РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
✉ 119991, Москва, Ленинский пр-т., д. 65,
119991, Moscow, Leninsky Prospekt, 65,
e-mail: artem.lobanov.8686@mail.ru