

опубл. 16.02.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 3. – С. 161–162.

23. Гидроциклон: пат. 2457 Респ. Беларусь, МПК В 04С 5/14. / Е. И. Мажугин, А. Н. Карташевич, А. Л. Казаков; заявитель Бел. гос. с/х акад. – № u 20050113; заявл. 04.03.2005; опубл. 28.02.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 1. – С. 166–167.

24. Мажугин, Е. И. Результаты определения эффективности интенсификации гидроциклонной очистки моющих растворов в условиях ремонтного производства / Е. И. Мажугин, А. Л. Казаков // Вестник БГСХА. – 2007. – № 3. – С. 106–107.

Аннотация. Обоснована актуальность очистки водных растворов СМС технического назначения. Теоретическим анализом установлено, что основными факторами стабилизации частиц загрязнений в растворах СМС являются электростатический, структурно-механический и сольватационный факторы. Все факторы стабилизации дополняют друг друга. Показано, что уменьшения агрегативной устойчивости загрязнений можно достичь электромагнитной обработкой раствора.

Приведены основные результаты экспериментальных исследований. Основные результаты проверены и подтверждены в производственных условиях.

Ключевые слова: водные растворы моющих средств, двойной электрический слой, магнитная обработка воды, гидроциклонирование.

УДК 621.436.004:665.753.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ ДИЗЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР

А. Н. КАРТАШЕВИЧ¹, д-р техн. наук, профессор
А. В. ГОРДЕЕНКО¹, канд. техн. наук, доцент
О. В. ПОНТАЛЕВ², канд. техн. наук, доцент

¹УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
Горки, Республика Беларусь

²УО «Барановичский государственный университет»,
Барановичи, Республика Беларусь

Введение. Одна из важнейших эксплуатационных характеристик дизельного топлива – его низкотемпературные свойства, характеризующие подвижность топлива при отрицательной температуре. В ди-

зельном топливе содержатся растворенные парафиновые углеводороды, которые при понижении температуры кристаллизуются. Низкотемпературные свойства оцениваются температурой помутнения и застывания.

Температура помутнения – это температура, при которой меняется фазовый состав топлива, так как наряду с жидкой фазой появляется твердая. При этой температуре топливо в условиях испытания начинает мутнеть.

Температура застывания – это температура, при которой топливо полностью теряет подвижность.

При помутнении дизельное топливо не теряет текучести. Размеры кристаллов таковы, что они проходят через элементы топливных фильтров, образуя на них тонкую парафиновую плёнку.

Нарушение подачи топлива из-за его помутнения возможно при пуске и прогреве дизеля. Для обеспечения нормальной эксплуатации двигателя необходимо, чтобы температура помутнения дизельного топлива была ниже температуры окружающего воздуха.

Значительное падение температуры окружающего воздуха приводит к существенному изменению свойств дизельного топлива, ухудшается испаряемость, затрудняется его прокачиваемость по трубопроводам и через фильтры (т. е. повышается сопротивление линии низкого давления системы питания и, как следствие, уменьшается коэффициент наполнения насоса высокого давления), снижается воспламеняемость, что затрудняет пуск и эксплуатацию техники с дизельными двигателями. Литературные данные свидетельствуют о том, что наиболее критическим участком топливной системы дизеля, работающего в условиях отрицательных температур, является линия всасывания топливopодкачивающего насоса (ТПН) с фильтром грубой очистки (ФГО), который первым забивается образующимися кристаллами H -алканов [1]. Эксплуатационные испытания показали, что машины с дизельным двигателем американского и западноевропейского производства перестают нормально функционировать при температуре окружающей среды на 5–10 градусов ниже температуры помутнения топлива. В 47 % это происходит вследствие забивки топливных фильтров кристаллами твердых углеводородов, а в 53 % из-за застывания топлива в топливопроводах.

Основная часть. Для изучения процесса образования H -алканов в дизельном топливе нами были проведены исследования по определению количества кристаллов парафинов в топливе марки ДТ-Л-К5

СТБ 1658-2015, которое наиболее распространено в переходной осенне-зимний период. Исследования проводились на спектрофотометре СФ-26 согласно методике, приведенной в работе [2] при длине волны спектра 1000 нм для двух образцов топлив с температурами помутнения и застывания $t_{п1} = -6\text{ }^{\circ}\text{C}$ $t_3 = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_{п2} = -2\text{ }^{\circ}\text{C}$ $t_3 = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Для этого в монохроматический поток света поочередно вводился образец дизельного топлива (топливо с температурой $+28\text{ }^{\circ}\text{C}$, которая соответствует температуре кристаллизации Н-октодекана) и образцы топлива которые подлежат измерению в интервале температур от $+28\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коэффициент пропускания светового потока топлива при $t = +28\text{ }^{\circ}\text{C}$ принимался за 100 %, а при введении топлива с $t = +28\text{ }^{\circ}\text{C} \dots -28\text{ }^{\circ}\text{C}$, показаниям измерительного прибора соответствовала величина пропускания в процентах. Измерение температуры топлива осуществлялось терморезисторами КС-22 и цифровым вольт-килоомметром ВК2-6.

Влияние температуры объем Н-алканов исследуемых образцов топлива представлено на рис. 1.

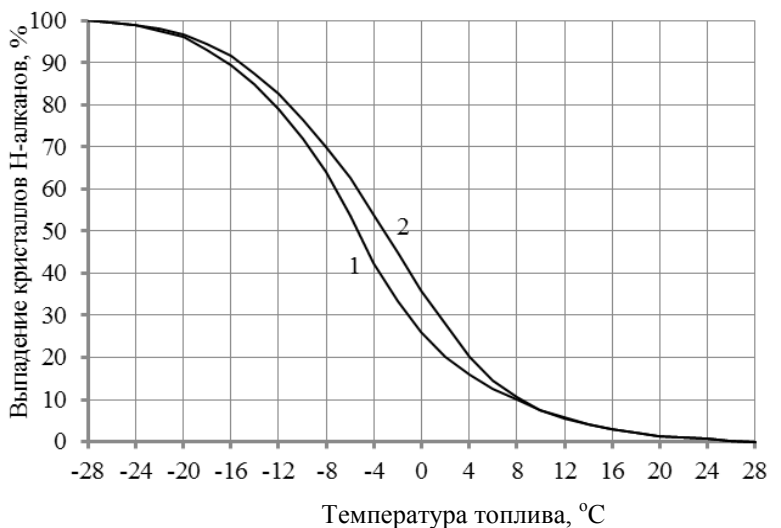


Рис. 1. Зависимость содержания Н-алканов в дизельном топливе от температуры:

- 1 – топливо с температурами помутнения $t_{п1} = -6\text{ }^{\circ}\text{C}$ и застывания $t_3 = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 2 – топливо с температурами помутнения $t_{п2} = -2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и застывания $t_3 = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Анализируя приведенные кривые, можно отметить, что при снижении температуры дизельного топлива от +28 °С до +8 °С количество Н-алканов плавно увеличивается от 0 % до 10 %. Понижение температуры топлива от +8 °С до температуры застывания вызывает резкое нарастание кристаллической фазы до 80 %. Дальнейшее снижение температуры ведет к плавному увеличению кристаллической фазы до 100 % (при $T = -28$ °С). При температуре помутнения дизельного топлива количество кристаллов Н-алканов составляет около 50 %. Обобщая изложенное выше, можно сделать вывод, что процесс образования парафинов в дизельном топливе марки «Л» непрерывный в температурном интервале от +28 °С до -28 °С.

Для обеспечения работоспособности топливной системы дизеля в условиях отрицательных температур нами предложен ряд электронагревательных устройств [3, 4, 5], предназначенных для плавления кристаллов Н-алканов в топливе. Однако отсутствие теоретических исследований минимальной температуры топлива, до которой необходимо производить разогрев, затрудняет применение вышеприведенных устройств.

Определим минимальную температуру топлива, при которой возможна работа топливной системы дизеля без дополнительных нагревательных устройств. Для этого воспользуемся уравнением неразрывности потока и уравнением Бернулли для реальной жидкости. Рассмотрим всасывающую линию топливной системы дизеля, работающего на номинальном режиме, выполненную по традиционной схеме, когда ФГО расположен перед ТПН. Для данного случая уравнение Бернулли будет иметь следующий вид [6]:

$$Z_1 + H + \alpha_1(\vartheta_1^2/2g) = Z_2 - (p_{\text{вак}}/\rho g) + \alpha_2(\vartheta_2^2/2g) + \Sigma h, \quad (1)$$

где Z_1, Z_2 – высота расположения выхода из топливного бака и входа в ТПН, отсчитанная от произвольной горизонтальной плоскости сравнения, м; H – высота столба топлива в баке, м; α_1, α_2 – коэффициенты Кориолиса в рассматриваемых сечениях; ϑ_1, ϑ_2 – средние скорости потока в рассматриваемых сечениях, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ – плотность топлива, кг/м³; Σh – суммарные потери напора между рассматриваемыми сечениями, м; $p_{\text{вак}}$ – вакуумметрическое давление, создаваемое ТПН, Н/м².

Уравнение неразрывности потока жидкости можно записать следующим образом [6]:

$$\vartheta_1 \omega_1 = \vartheta_2 \omega_2 = Q, \quad (2)$$

где ω_1 , ω_2 – площади потока в рассматриваемых сечениях, м^2 ; Q – расход топлива через ТПН, $\text{м}^3/\text{с}$.

Условие обеспечения работоспособности линии низкого давления дизеля с учетом уравнений (1) и (2), а также тем, что при ламинарном движении жидкости в трубах коэффициент Кориолиса $\alpha_1 = \alpha_2 = 2,0$ [6], можно представить следующим образом:

$$\Sigma h \leq H + (Z_1 - Z_2) + (p_{\text{вак}}/\rho g) + (\vartheta_2^2/g) ((\omega_2^2/\omega_1^2) - 1), \quad (3)$$

Суммарные потери напора складываются из потерь напора по длине трубопроводов $\Sigma h_{\text{дл}}$ и потерь от местных сопротивлений $\Sigma h_{\text{м}}$ [7].

$$\Sigma h = \Sigma h_{\text{дл}} + \Sigma h_i. \quad (4)$$

Потери напора по длине трубопроводов определяются по формуле [7]:

$$\Sigma h_{\text{дл}} = \lambda(L/2)(\vartheta_{\text{тр}}^2/d_{\text{тр}}g) + \Sigma h_{\text{м}}, \quad (5)$$

где L – суммарная длина трубопроводов от бака до ТПН, м ;

$d_{\text{тр}}$ – диаметр трубопровода, м ;

$\vartheta_{\text{тр}}$ – средняя скорость движения топлива по трубопроводам, $\text{м}/\text{с}$;

λ – коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси).

При ламинарном движении топлива по трубопроводам круглого сечения коэффициент Дарси определяется по формуле [7]:

$$\lambda = 64 / \text{Re}, \quad (6)$$

где Re – число Рейнольдса.

Число Рейнольдса для труб круглого сечения определится по формуле [7]:

$$\text{Re} = (\vartheta_{\text{тр}}d_{\text{тр}}) / \nu, \quad (7)$$

где ν – кинематическая вязкость дизельного топлива, $\text{мм}^2/\text{с}$.

Суммарные потери от местных сопротивлений при ламинарном движении топлива оцениваются зависимостью [6]:

$$\Sigma h_{\text{м}} = \Sigma_{i=1}^n (\vartheta_i^2/2g) (\xi_{\text{кв}i} + (A_i / \text{Re}_i)), \quad (8)$$

где $\xi_{\text{кв}i}$ – коэффициент i -го местного сопротивления квадратичной области; A_i – коэффициент i -го сопротивления, значение коэффициентов A_i и $\xi_{\text{кв}i}$ приведены в работах [6, 7, 8]; ϑ_i – средняя скорость топлива в

i -м сопротивлению; Re_i – число Рейнольдса для i -го местного сопротивления.

Число Рейнольдса для i -го местного сопротивления определяется по выражению [9]:

$$Re_i = (\vartheta_i l_{0i}) / \nu, \quad (9)$$

где l_{0i} – определяющий размер i -го местного сопротивления.

Динамическая вязкость дизельного топлива зависит от температуры и может быть определена по формуле [10]:

$$\mu = \mu_0 e^{-\beta(T - T_0)}, \quad (10)$$

где μ , μ_0 – соответственно динамическая вязкость дизельного топлива при температуре T и T_0 , Па·с; β – коэффициент, значение которого для дизельного топлива изменяется в пределах 0,025...0,03 [10].

Зависимость между динамической и кинематической вязкостью устанавливается соотношением $\mu = \nu \rho$.

Считаем, что плотность топлива, в рассматриваемом температурном интервале является величиной постоянной, тогда с учетом формулы (10) будем иметь:

$$\nu = \nu_0 e^{-\beta(T - T_0)}, \quad (11)$$

где ν_0 – кинематическая вязкость дизельного топлива при +20 °С (293 К), мм²/с.

После подстановки формулы (11) в выражение (9) и далее (8), а также (11) в зависимости (7), (6) и (5), с учетом уравнения (4) и неравенства (3), после соответствующих преобразований, получим:

$$T \geq (1/\beta) \ln ((\nu_0(N + 64L\vartheta_{tr}) / 2d_{tr}^2(M + (P_{вак}/\rho) + R - K)) + T_0). \quad (12)$$

В данном выражении приняты обозначения:

N – коэффициент суммарных потерь, пропускной способности системы, отнесенный к единице длины трубопровода,

$$N = d_{tr}^2 \sum_{i=1}^n ((\vartheta_i A_i) / L_{0i}), \quad (13)$$

где M – коэффициент снижения напора на единице высоты столба жидкости в трубопроводе,

$$M = g(H + Z_1 - Z_2), \quad (14)$$

где R – коэффициент снижения напора за счет разности площадей живого сечения на входе и выходе линии низкого давления системы питания дизеля,

$$R = \vartheta_2^2((\omega_2^2/\omega_1^2) - 1), \quad (15)$$

где K – коэффициент, учитывающий снижение скорости потока топлива за счет суммарных местных сопротивлений,

$$K = 0,5 \sum_{i=1}^n (\xi_{\text{КВ}i} \cdot \vartheta_i^2). \quad (16)$$

По формуле (12), с учетом (13)–(16), может быть определена минимальная температура дизельного топлива, при которой обеспечивается нормальная работа линии низкого давления топливной системы дизеля.

В качестве примера рассмотрим топливную систему дизеля Д-243 (трактора Беларус-920). При расчетах принята высота столба топлива в баке максимальной, а вакуумметрическое давление, создаваемое ТПН, равным 12 кПа, что является минимальным для топливоподкачивающих насосов по ГОСТ 15829-77Е, необходимым для получения номинальной объемной подачи насоса высокого давления (ТНВД) [11]. При расчете суммарных потерь от местных гидравлических сопротивлений учитывали: сетчатый фильтр на выходе из бака, вход из бака в топливопровод, кран пробочный, тройник, вход в штуцер ФГО, внезапное расширение в ФГО, сетчатый фильтр ФГО, плавное сужение фильтрующего элемента ФГО, выход из штуцера ФГО, вход в штуцер ТПН, а также плавные повороты трубопроводов.

В результате расчетов по формулам (13), (14), (15), (16) и (12) была получена зависимость минимальной температуры топлива (для топливной системы дизеля Д-243) от кинематической вязкости при +20 °С (293 К), при которой возможна нормальная работа топливной системы (рис. 2).

Для определения минимальной температуры дизельного топлива, при которой возможна нормальная работа системы топливоподдачи, необходимо на оси абсцисс отметить значение вязкости топлива при 293 К, восстановить в выбранной точке перпендикуляр до пересечения с полученной кривой и снести это значение на ось ординат, где и определится искомая температура.

Нами были проведены стендовые испытания топливной системы дизеля Д-243 в условиях отрицательных температур на стенде КИ-22205. Цель исследований заключалась в определении минимальной температуры дизельного топлива, при которой разрежение на вса-

сывании ТПН не превышало 12 кПа. Исследования проводились на трех образцах дизельных топливах марки ДТ-Л-К5 с кинематической вязкостью при 293 К соответственно 4,5 мм²/с; 5 мм²/с и 6 мм²/с. В результате эксперимента было определено, что для топлива с кинематической вязкостью при 293 К (+20 °С) равной 4,5 мм²/с разрежение перед ТПН начинает превышать минимально-допустимое при температуре топлива –8 °С (265 К), для топлива с вязкостью 5 мм²/с – при –5 °С (268 К), и для топлива с вязкостью 6 мм²/с – при +1 °С (274 К).



Рис. 2. Зависимость минимальной температуры прокачивания дизельного топлива по системе питания от его кинематической вязкости ν_0 при 293 К (20 °С)

Таким образом, данные полученные экспериментально и теоретически хорошо согласуются. Поэтому формула (12) может быть рекомендована для расчета минимальной температуры топлива, при которой возможна нормальная работа линии низкого давления автотракторного дизеля без разрывов потока топлива.

Заключение.

1. Процесс образования, парафинов в дизельном топливе марки ДТ-Л-К5 носит непрерывный характер в температурном интервале от +28 °С до –28 °С.

2. Полученная теоретическая зависимость позволит определить минимальную температуру дизельного топлива, при которой возможна работа топливной системы дизеля без дополнительных нагревательных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Улучшение пусковых качеств автотракторных дизелей в зимний период эксплуатации. Монография / А. Н. Карташевич [и др.] – Горки: БГСХА, 2005. – 172 с.
2. Карташэвіч А. М. Працэс утварэння крышталёў парафінаў у дызельным паліве / А. М. Карташэвіч, В. К. Кажушка // Весці акадэміі аграрных навук Беларусі. – 1994. – № 1. – С. 115–117.
3. Патент ВУ № 1766 U F 02M 31/00, F02N 17/00. Система облегчения работы дизеля при низких температурах. А. Н. Карташевич, А. В. Гордеенко, Д. С. Разинкевич; заявл. 18.03.2002; опубл. 22.03.2004; Бюл. № 2, 23 с.
4. Патент ВU № 1767 U F 02B 77/00. Система защиты топливной аппаратуры дизеля. А. Н. Карташевич, А. В. Гордеенко, Д. С. Разинкевич; заявл. 18.03.2002; опубл. 22.03.2004; Бюл. № 2, 23 с.
5. Пат. 2007609 РФ, МКИ F-02 М 31/12. Подогреватель дизельного топлива / А. Н. Карташевич, В. С. Бранцевич, В. Д. Прудников. – № 4896914/ 06; заявл. 26.12.90; опубл. 15.02.94; Бюл. № 3.
6. Штеренлихт, Д. В. Гидравлика / Д. В. Штеренлихт. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.
7. Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П. Г. Киселева. – Москва: Энергия, 1974. – 312 с.
8. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
9. Кутателадзе, С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. Справ. Пособие / С. С. Кутателадзе. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
10. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы / Т. М. Башта [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1982. – 423 с.
11. Фаннлейб, Б. Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей: Справочник / Б. Н. Фаннлейб. – Ленинград: Машиностроение, 1990. – 352 с.
12. Гордеенко, А. В. Улучшение пусковых качеств и условий работы автотракторных дизелей в зимний период эксплуатации: дисс. ... канд. техн. наук / А. В. Гордеенко. – Горки: БГСХА, 1998.

Аннотация. Приведены результаты исследований по определению количества кристаллов *n*-алканов в дизельном топливе в зависимости от температуры. На основе использования уравнений гидравлики получена зависимость для определения минимальной температуры топлива, при которой возможна работа топливной системы дизеля без дополнительных нагревательных устройств. Теоретические исследования подтверждены эксплуатационными испытаниями топливной системы дизеля Д-243 в условиях отрицательных температур на стенде КИ-22205.

Ключевые слова: трактор, дизельный двигатель, дизельное топливо, вязкость, температура застывания, кристаллы углеводородов, линия низкого давления, топливоподкачивающий насос, фильтр грубой очистки.