

УДК 621.436.004+665.753.4

А. Н. Карташевич, А. В. Гордеенко, О. В. Понталёв

Учреждение образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПРОКАЧИВАЕМОСТИ ТОПЛИВА В СИСТЕМЕ ПИТАНИЯ ДИЗЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ЗИМНЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

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, топливopодкачивающий насос, фильтр грубой очистки.

**Введение.** Температура окружающего воздуха оказывает существенное влияние на процесс топливоподачи дизеля, что связано с изменением вязкости дизельного топлива и кристаллизации парафинистых углеводородов. Снижение надёжности автотракторных дизелей в условиях отрицательных температур обусловлено выпадением кристаллов парафинов в топливе, повышением сопротивления линии низкого давления системы питания и, как следствие, уменьшением коэффициента наполнения топливного насоса высокого давления (далее — ТНВД). Литературные данные свидетельствуют о том, что наиболее критическим участком топливной системы дизеля, работающего в условиях отрицательных температур, является линия всасывания топливopодкачивающего насоса (далее — ТПН) с фильтром грубой очистки (далее — ФГО), который первым забивается образующимися кристаллами *n*-алканов [1]. Эксплуатационные испытания показали, что машины с дизельным двигателем американского и западноевропейского производства перестают нормально функционировать при температуре окружающей среды на 5...10°C ниже температуры помутнения топлива. Это происходит вследствие забивания топливных фильтров кристаллами твёрдых углеводородов (47%) случаев, а также из-за застывания топлива в топливопроводах (53%).

В настоящее время существует три возможности предотвращения этого нежелательного явления: 1) воздействие на свойства дизельного топлива в процессе его производства и потребления; 2) адаптация конструкции топливной системы дизеля к отрицательным температурам; 3) создание условий, смягчающих негативное воздействие внешних факторов как на работу агрегатов топливоподающей системы, так и на свойства самого топлива.

Первый способ в основном сводится к добавлению депрессорных присадок, которые повышают текучесть и прокачиваемость топлив при низких температурах. Однако эффективность действия данных присадок зависит от их концентрации в топливе, его углеводородного состава и наличия в нём асфальто-смолистых веществ. Ввод присадок в дизельное топливо с присутствием воды, которая всегда содержится в условиях эксплуатации, неблагоприятно сказывается на эффективности их применения. Поэтому эффект от депрессорных присадок в реальных условиях всегда оказывается ниже, чем в ходе специальных целевых испытаний.

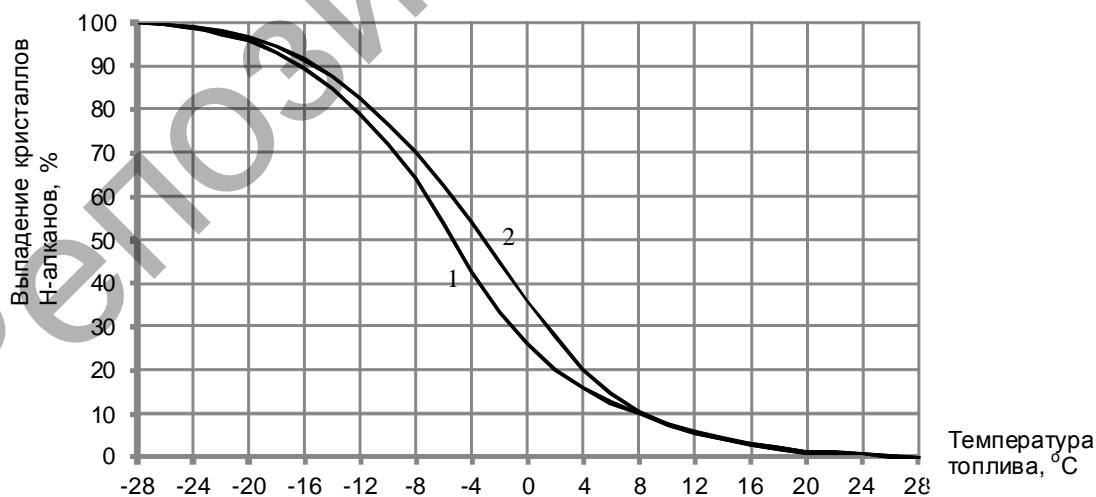
Второй способ направлен на улучшение низкотемпературной прокачиваемости дизельного топлива. Реализация программы IGF-3 европейского координационного совета по совершенствованию методов испытаний смазок и моторных топлив позволяет лишь определить арсенал средств улучшения работоспособности дизельных топлив при низких температурах, а также количественно оценить влияние того или иного фактора.

Третий способ может быть реализован как на стадии создания дизельных установок (размещение агрегатов в местах, защищённых от обдува холодным воздухом), так и в эксплуатации.

**Основная часть.** Для изучения процесса образования  $\text{H}$ -алканов в дизельном топливе нами были проведены исследования по определению количества кристаллов парафинов в топливе марки «Л» ГОСТ 305-82, которое наиболее распространено в переходный осенне-зимний период. Исследования проводились на спектрофотометре СФ-26 согласно методике, приведённой в работе [2], при длине волны спектра 1 000 нм для двух образцов топлив с температурами помутнения и застывания  $t_{\text{п}}$ , равными  $-6^{\circ}\text{C}$  и  $-2^{\circ}\text{C}$ , и температурами застывания  $t_{\text{з}}$ , равными  $-12^{\circ}\text{C}$  и  $-10^{\circ}\text{C}$  соответственно. Для этого в монохроматический поток света поочерёдно вводился образец дизельного топлива (топливо с температурой  $+28^{\circ}\text{C}$ , которая соответствует температуре кристаллизации  $\text{H}$ -октодекана) и образцы топлива, которые подлежат измерению в интервале температур от  $+28^{\circ}\text{C}$  до  $-28^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент пропускания светового потока топлива при  $t$ , равной  $+28^{\circ}\text{C}$ , принимался за 100%, а при введении топлива с  $t$  от  $+28$  до  $-28^{\circ}\text{C}$  показаниями измерительного прибора соответствовала величина пропускания в процентах. Измерение температуры топлива осуществлялось терморезисторами КС-22 и цифровым вольт-килоомметром ВК2-6. В результате выявлено влияние температуры на объём  $\text{H}$ -алканов исследуемых образцов топлива (рисунок 1).

Анализируя приведённые кривые (см. рисунок 1), можно отметить, что при снижении температуры дизельного топлива от  $+28^{\circ}\text{C}$  до  $+8^{\circ}\text{C}$  количество  $\text{H}$ -алканов плавно увеличивается от 0% до 10%. Понижение температуры топлива от  $+8^{\circ}\text{C}$  до температуры застывания вызывает резкое нарастание кристаллической фазы до 80%. Дальнейшее снижение температуры ведёт к плавному увеличению кристаллической фазы до 100% (при  $t$ , равной  $-28^{\circ}\text{C}$ ). При температуре помутнения дизельного топлива количество кристаллов  $\text{H}$ -алканов составляет около 50%. Обобщая изложенное выше, можно сделать вывод, что процесс образования парафинов в дизельном топливе марки «Л» непрерывный в температурном интервале от  $+28^{\circ}\text{C}$  до  $-28^{\circ}\text{C}$ .

Для обеспечения работоспособности топливной системы дизеля в условиях отрицательных температур нами предложен ряд электронагревательных устройств [3], предназначенных для плавления кристаллов  $\text{H}$ -алканов в топливе. Однако отсутствие теоретических исследований минимальной температуры топлива, до которой необходимо производить разогрев, затрудняет применение вышеуказанных устройств.



1 — топливо с температурами помутнения  $t_{\text{п}} -6^{\circ}\text{C}$  и застывания  $t_{\text{з}} -12^{\circ}\text{C}$ ;  
2 — топливо с температурами помутнения  $t_{\text{п}} -2^{\circ}\text{C}$  и застывания  $t_{\text{з}} -10^{\circ}\text{C}$

Рисунок 1. — Зависимость содержания  $\text{H}$ -алканов в дизельном топливе от температуры

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 [4]:

$$Z_1 + H + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 - \frac{P_{\text{вак}}}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \Sigma h, \quad (1)$$

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;

$\alpha_1, \alpha_2$  — коэффициенты Кориолиса в рассматриваемых сечениях;

$v_1, v_2$  — средние скорости потока в рассматриваемых сечениях, м / с;

$g$  — ускорение свободного падения, м / с<sup>2</sup>;

$P_{\text{вак}}$  — вакуумметрическое давление, создаваемое ТПН, Н / м<sup>2</sup>;

$\rho$  — плотность топлива, кг / м<sup>3</sup>;

$\Sigma h$  — суммарные потери напора между рассматриваемыми сечениями, м.

Уравнение неразрывности потока жидкости можно записать следующим образом [5]:

$$v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2 = Q, \quad (2)$$

где  $\omega_1, \omega_2$  — площади потока в рассматриваемых сечениях, м<sup>2</sup>;

$Q$  — расход топлива через ТПН, м<sup>3</sup> / с.

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

$$\Sigma h \leq H + (Z_1 - Z_2) + \frac{P_{\text{вак}}}{\rho g} + \frac{v_2^2}{g} \left( \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} - 1 \right). \quad (3)$$

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

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

Потери напора по длине трубопроводов определяются по формуле [8]

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

где  $\lambda$  — коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси);

$L$  — суммарная длина трубопроводов от топливного бака до ТПН, м;

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

$d_{\text{тр}}$  — диаметр трубопровода, м.

При ламинарном движении топлива по трубопроводам круглого сечения коэффициент Дарси определяется по формуле [9]

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

где  $Re$  — число Рейнольдса, которое для труб круглого сечения определяется по формуле [10]

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

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

Суммарные потери от местных сопротивлений при ламинарном движении топлива оцениваются зависимостью [11]

$$\Sigma h_m = \sum_{i=1}^n \frac{\vartheta_i^2}{2g} \left( \xi_{кв_i} + \frac{A_i}{Re_i} \right), \quad (8)$$

где  $\vartheta_i$  — средняя скорость топлива в  $i$ -м сопротивлении;

$\xi_{кв_i}$  — коэффициент  $i$ -го местного сопротивления квадратичной области;

$A_i$  — коэффициент  $i$ -го сопротивления (значения коэффициентов  $A_i$  и  $\xi_{кв_i}$  приведены в работах [12]);

$Re_i$  — число Рейнольдса для  $i$ -го местного сопротивления, которое определяется по выражению [13]

$$Re_i = \frac{\vartheta_i \mathbf{1}_{oi}}{\nu}, \quad (9)$$

где  $\mathbf{1}_{oi}$  — определяющий размер  $i$ -го местного сопротивления.

Динамическая вязкость дизельного топлива зависит от температуры и может быть определена по формуле [14]

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

где  $\mu, \mu_0$  — динамическая вязкость дизельного топлива при температуре  $T$  и  $T_0$  ( $\text{Па} \cdot \text{с}$ ) соответственно;

$\beta$  — коэффициент, значение которого для дизельного топлива изменяется в пределах 0,025...0,03 [15].

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

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

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

где  $\nu_0$  — кинематическая вязкость дизельного топлива при  $t + 20^\circ\text{C}$  (293 K),  $\text{мм}^2 / \text{с}$ .

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

$$T \geq \frac{1}{\beta} \ln \cdot \frac{\nu_0 (N + 64 \cdot L \cdot \vartheta_{тр})}{2d_{тр}^2 \left( M + \frac{P_{вак}}{\rho} + R - K \right)} + T_0, \quad (12)$$

где  $N$  — коэффициент суммарных потерь пропускной способности системы, отнесённый к единице длины трубопровода, определяемый по формуле

$$N = d^2 \sum_{i=1}^n \frac{\vartheta_i A_i}{1_{oi}}; \quad (13)$$

$M$  — коэффициент снижения напора на единице высоты столба жидкости в трубопроводе, определяемый из выражения

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

$R$  — коэффициент снижения напора за счёт разности площадей живого сечения на входе и выходе линии низкого давления системы питания дизеля, вычисляемый по формуле

$$R = \vartheta_2^2 \left( \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} - 1 \right); \quad (15)$$

$K$  — коэффициент, учитывающий снижение скорости потока топлива за счёт суммарных местных сопротивлений, определяемый следующим образом:

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\xi_{\text{кв}_i} \cdot \vartheta_i^2). \quad (16)$$

По формуле (12) с учётом выражений (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 расчётах принята высота столба топлива в баке максимальной, а вакуумметрическое давление, создаваемое ТПН, равным 12 кПа, что является минимальным для ТПН по ГОСТ 15829-77Е, необходимым для получения номинальной объёмной подачи ТНВД [16]. При расчёте 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.



Рисунок 2. — Зависимость минимальной температуры прокачивания дизельного топлива от его кинематической вязкости  $\nu_0$  при 293 К (20°C)

В результате расчётов по формулам (13—16) и (12) получена зависимость минимальной температуры топлива (для топливной системы дизеля Д-243) от кинематической вязкости при  $t + 20^\circ\text{C}$  (293 К), при которой возможна нормальная работа топливной системы (рисунок 2).

Для определения минимальной температуры дизельного топлива, при которой возможна нормальная работа системы топливоподачи, необходимо на оси абсцисс (см. рисунок 2) 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 всасывании ТПН не превышало 12 кПа. Испытания проводились на трёх образцах дизельных топлив марки «Л» с кинематической вязкостью 4,5 мм<sup>2</sup>/с; 5,0 мм<sup>2</sup>/с и 6,0 мм<sup>2</sup>/с (при 293 К) соответственно. В результате эксперимента было определено, что для топлива с кинематической вязкостью при 293 К (+20°C), равной 4,5 мм<sup>2</sup>/с, разрежение перед ТПН начинает превышать минимально допустимое при температуре топлива  $-8^\circ\text{C}$  (265 К), для топлива с вязкостью 5,0 мм<sup>2</sup>/с — при  $-5^\circ\text{C}$  (268 К), и для топлива с вязкостью 6,0 мм<sup>2</sup>/с — при  $+1^\circ\text{C}$  (274 К).

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

**Заключение.** Процесс образования парафинов в дизельном топливе марки «Л» носит непрерывный характер в температурном интервале от  $+28^\circ\text{C}$  до  $-28^\circ\text{C}$ . Полученная теоретическая зависимость позволяет определить минимальную температуру дизельного топлива, при которой возможна работа топливной системы дизеля без дополнительных нагревательных устройств.

#### Список цитируемых источников

1. Улучшение пусковых качеств автотракторных дизелей в зимний период эксплуатации : моногр. / А. Н. Карташевич [и др.]. Горки : БГСХА, 2005. 172 с.
2. Карташевiч А. М., Кажушка В. К. Працэс утварэння крышталёў парафінаў у дызельным палiве // Весцi Акадэміi аграрных навук Беларусi. 1994. № 1. С. 115—117.
3. Система облегчения работы дизеля при низких температурах : пат. ВУ № 1766 U F 02M 31/00, F02N 17/00 ; заявл 18.03.02 ; опубл. 22.03.04, Бюл. № 2, 23 с. ; Система защиты топливной аппаратуры дизеля : пат. ВУ № 1767 U F 02B 77/00 ; заявл 18.03.02 ; опубл. 22.03.04, Бюл. № 2, 23 с. ; Подогреватель дизельного топлива : пат. 2007609 РФ, МКИ F-02 M 31/12 ; № 4896914/ 06 ; заявл. 26.12.90 ; опубл. 15.02.94 ; Бюл. № 3.
4. Штеренлихт Д. В. Гидравлика. М. : Энергоатомиздат, 1984. 640 с.
5. Там же.
6. Там же.
7. Справочник по гидравлическим расчётам / под ред. П. Г. Киселёва. М. : Энергия, 1974. 312 с.
8. Там же.
9. Там же.
10. Там же.
11. Штеренлихт Д. В. Гидравлика. 640 с.
12. Там же. ; Справочник по гидравлическим расчётам / под ред. П. Г. Киселёва. 312 с. ; Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М. : Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
13. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление : справ. пособие. М. : Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
14. Гидравлика, гидромашини и гидроприводы / Т. М. Башта [и др.]. М. : Машиностроение, 1982. 423 с.
15. Там же.
16. Фаннлейб Б. Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей : справ. Л. : Машиностроение, 1990. 352 с.

The research showed that the process of paraffin shift in diesel fuel of the brand “L” has a continuous character in a temperature interval from  $+28^\circ\text{C}$  to  $-28^\circ\text{C}$ .

In the work the theoretical dependence allowing to determine the minimum temperature of diesel fuel has been fixed.

**Key words:** tractor, diesel engine, diesel fuel, viscosity, hardening temperature, crystals of hydrocarbons, line of low pressure, fuel pump, filter of rough cleaning.