

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕТАНОВОГО ЧИСЛА И ПЕРИОДА ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОПЛИВ

А.Н. Карташевич, докт. техн. наук, профессор (УО БГСХА); С.А. Плотников, доцент (Кировский индустриальный институт)

### Аннотация

*В связи с истощением запасов невозобновляемых природных энергоносителей широкое распространение в качестве топлива для дизелей получили жидкие альтернативные виды топлива (рапсовое и соевое масла с добавками алифатических спиртов). Однако из-за недостаточной изученности влияния этих видов топлива на долговечность работы двигателей необходимо регулярно оценивать их квалификационные показатели. К их числу в первую очередь относят цетановое число и период задержки воспламенения. Статья рассматривает эти актуальные вопросы.*

### Введение

Использование в качестве топлива для дизелей жидких альтернативных топлив (рапсового, соевого и др. масел) с добавками алифатических спиртов (этанол и метанола) заставляет исследователей проводить теоретическую оценку свойств этих топлив и их влияния на показатели рабочего процесса дизеля.

Одним из основных квалификационных показателей дизельных топлив (ДТ) является их воспламеняемость, которая оценивается цетановым числом (ЦЧ) по ГОСТ 3122-67. Соответственно, возникает проблема определения ЦЧ спиртосодержащих топлив.

Согласно ГОСТ 3122-67 при определении ЦЧ используется предкамерный одноцилиндровый двигатель с переменным моментом начала впрыскивания.

При этом наиболее часто используют метод совпадения вспышек. Для испытуемого топлива подбирается степень сжатия так, чтобы момент начала воспламенения был равным  $13^0$  пкв.

Цетановое число топлива при этом пересчитывают по соотношению:

$$ЦЧ = Ц_1 + (Ц_2 - Ц_1) \frac{E_1 - E}{E_1 - E_2}, \quad (1)$$

где  $Ц_1$  – содержание цетана в смеси с  $\alpha$ -метилнафталином, дающее совпадение вспышек при большей степени сжатия  $\epsilon_1$ ;

$Ц_2$  – содержание цетана в смеси с  $\alpha$ -метилнафталином, дающее совпадение вспышек при меньшей степени сжатия  $\epsilon_2$ ;

$\epsilon$  – степень сжатия при работе на испытуемом топливе.

Для нахождения ЦЧ по методу совпадения вспышек можно использовать также модифицированную цетановую шкалу, представляющую собой зависимость степени сжатия  $\epsilon$  от % цетана в смеси с  $\alpha$ -метилнафталином при периоде задержки воспламенения, равном  $13^0$  угла поворота коленчатого вала.

При прочих равных условиях соотношение между  $\epsilon$  и % цетана будет зависеть от температуры воздуха на входе. Так, цетановое число, полученное по графику, представленному на рис. 1, определяется как цетановое число по шкале  $177^0\text{C}$  [1].

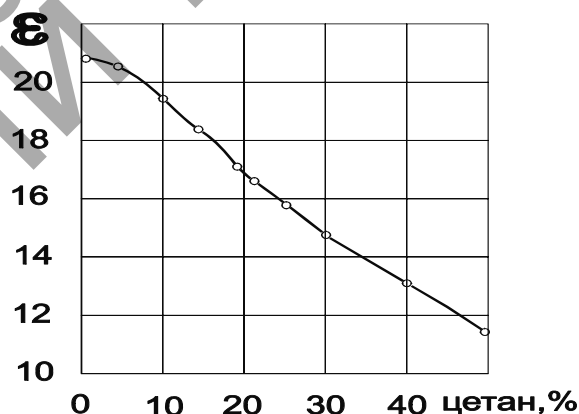


Рисунок 1. Зависимость между  $\epsilon$  и содержанием цетана.

### Основная часть

В связи с развитием многотопливных дизелей и массовым применением альтернативных топлив актуальной задачей стало определение воспламеняемости низкоцетановых углеводородов, входящих в состав топлив.

В Германии для определения ЦЧ дизельных топлив применяется установка BASF. При работе на стандартном режиме по DIN 51773 она позволяет измерять ЦЧ не ниже 25. Предложена также новая модификация метода измерения ЦЧ на установке BASF, [2], отличающаяся от стандартного метода только подогревом всасываемого воздуха от  $200 \pm 0,5^0\text{C}$ . Эта температура экспериментально выбрана как оптимальная, при которой достигается требуемое расширение диапазона измерений ЦЧ, обеспечивая удовлетворительную точность

оценки и стабильность рабочего процесса. Установлена большая температурная чувствительность  $\alpha$ -метилнафталина и его смесей с цетаном (например, по сравнению со смесями изоктана с  $n$ -гептаном) на повышение температуры воздуха на впуске.

В связи с этим в [2] вводят понятие температурной чувствительности углеводородов по характеристике их воспламеняемости и новую шкалу ЦЧ. Статистической обработкой экспериментальных данных получено уравнение:

$$\text{ЦЧ}^* = 0,835 \times \text{ЦЧ}_{200} + 16,19, \quad (2)$$

где  $\text{ЦЧ}_{200}$  – определенное при температуре воздуха на впуске  $200^\circ\text{C}$  цетановое число сравнительно со смесью цетана и  $\alpha$ -метилнафталина;

$\text{ЦЧ}^*$  – цетановое число, из которого исключена величина температурной чувствительности смеси цетана с  $\alpha$ -метилнафталином.

ЦЧ имеет наибольшее значение у парафиновых углеводородов и наименьшее – у ароматических. Среди парафиновых наибольшие ЦЧ имеют углеводороды нормального строения. Углеводороды с одной или несколькими боковыми цепями имеют меньшие ЦЧ. Особенно низкие цетановые числа имеют бициклические ароматические углеводороды. Увеличение числа атомов углеводорода в углеводородной молекуле ведет к росту ЦЧ. На рис. 2 по данным [3] показана зависимость ЦЧ от числа атомов углерода в молекуле.



Рисунок 2. Зависимость цетанового числа от числа атомов углерода в молекуле [11]:

1 –  $n$ -Гексадекан; 2 –  $\alpha$ -метилнафталин; 3 – метанол; 4 – этанол; 5 –  $n$ -Алканы (парафины); 6 –  $n$ -1-Алкены (олефины); 7 –  $n$ -Алкил-циклопентаны; 8 –  $n$ -Алкил-циклогексаны; 9 –  $n$ -Алкил-бензолы.

На рис. 3 по этим же данным показана взаимосвязь ЦЧ и нормальной температуры кипения для различных групп углеводородов.

При отсутствии моторных установок или необходимости аналитического расчета ЦЧ, определяют опытным лабораторным путем ряд стандартизованных показателей топлива и затем осуществляют их

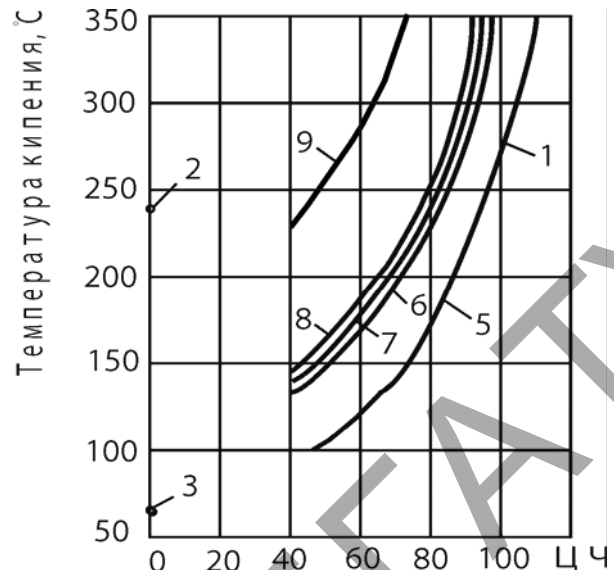


Рисунок 3. Зависимость цетанового числа от температуры кипения углеводородов [11] (обозначения на рис. 2).

пересчет для нахождения ЦЧ. Наиболее часто используют эмпирические соотношения между ЦЧ и плотностью, групповым составом, фракционной разгонкой, анилиновой точкой  $A_T$  и др.

Так, в работе [4] приводятся следующие возможные виды функциональных зависимостей для ЦЧ:  $\text{ЦЧ} = f_1(t_{50}, \rho)$ ;  $\text{ЦЧ} = f_1(t_{50}, \rho, A_T)$ ;  $\text{ЦЧ} = f_1(t_{50}, \rho, \%H)$ ;  $\text{ЦЧ} = f_1(t_{50}, \rho, \text{АУ}\% \text{ или ПУ}\%)$ ,

где:  $A_T$  – анилиновая точка;

АУ – содержание ароматических углеводородов;

ПУ – содержание парафиновых углеводородов.

Известны также соотношения, использующие в качестве основного параметра  $A_T$ , например [5]:

$$\text{ЦЧ} = 0,89A_T - 11,65 \quad (3)$$

В ряде работ предлагают уравнения, использующие в качестве определяющих ЦЧ параметров плотность топлива и кривую фракционной разгонки. Например, в [6] предлагают уравнение:

$$\text{ЦЧ} = 524 - 29,88 \sqrt[3]{t_c} - 2605 \times \rho / \sqrt[3]{t_c}, \quad (4)$$

$$\text{где } t_c = 0,3 \times t_{10} + 0,53 \times t_{50} + 0,17 \times t_{90},$$

которое является модификацией уравнения оптимального цетанового числа  $\text{ЦЧ}_0$ , приведенного там же:

$$\text{ЦЧ}_0 = 182 - 20,88 \sqrt[3]{t_c}. \quad (5)$$

Более сложная зависимость, получена в [7]:

$$\begin{aligned} \text{ЦЧ} = & 256,18 - 0,445A_T - 10,44 \sqrt[3]{t_c} - \\ & - 2,605 \rho / 2 \sqrt[3]{t_c}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\rho$  – плотность топлива в  $\text{кг}/\text{м}^3$  при  $20^\circ\text{C}$ .

В [8] даны уравнения, пригодные, по утверждению авторов, для определения ЦЧ бензиновых и нефтяных топлив, например, спиртов:

$$\text{ЦЧ} = 25,88 \times \ln t_{50} - 12,79 \times [\rho - 0,835] + 76,94 \times \ln H - 294,3 \quad (7)$$

или

$$\text{ЦЧ} = 21,56 \times \ln t_{50} - 59,346 \times [\rho - 0,835] + 75,455 \times \ln H - 265,2, \quad (8)$$

где –  $t_{50}$  в  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\rho$  в  $\text{г/см}^3$ ,  $H$  – содержание водорода по массе, (%).

Фирма “Этил” разработала новые, более точные уравнения для расчета цетанового числа широкого диапазона дизельных топлив [9]. Использовали данные по 1208 дистиллятным топливам, а также по 74 смешанным топливам, приготовленным из 39 компонентов: прямогонных дистиллятов, тяжелого бензина, легкого газойля каталитического крекинга, дистиллятов гидрокрекинга, термического крекинга и замедленного коксования. Качество топлив менялось в широком диапазоне. Для каждого компонента и смешанного топлива измеряли плотность, фракционный состав, содержание серы, вязкость и анилиновую точку, цетановое число. Измерение цетанового числа проводили на чистом топливе, а также при добавлении присадок, улучшающих воспламеняемость. Использовали также данные по целому ряду других дизельных топлив, включая 76 канадских. Некоторые из этих топлив были приготовлены из обычных компонентов, другие – из дистиллятов каталитического крекинга, синтетического дизельного топлива, узких и широких топливных фракций.

Предлагаемые уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} \text{ЦЧ} = & 16,419 - 1,332 \frac{A_T}{100} + 12,9676 \left( \frac{A_T}{100} \right)^2 - \\ & - 0,205 \left( \frac{A_T}{100} \right)^3 + 1,1723 \left( \frac{A_T}{100} \right)^4 \quad (9) \end{aligned}$$

$$\text{ЦЧ} = 21,843 - 0,33924 \times (\text{ЦИ}) = 0,018669 \times (\text{ЦИ})^2 \quad (10)$$

$$\text{ЦЧ} = 12,822 + 0,1164 \times (\text{ЦИ}) = 0,012976 \times (\text{ЦИ})^2 \quad (11)$$

Уравнения (10) и (11) имеют примерно равную точность.

Здесь ЦИ – цетановый (дизельный) индекс, определяемый по ASTM Д 976-80 по соотношениям [10]:

$$\begin{aligned} \text{ЦИ} = & 0,9187 \times \\ & \times \left( \frac{141,5}{\rho} + 131,5 \right)^{1,26687} \times \left( \frac{1,8t_{50} + 32}{100} \right)^{1,44227} \quad (12) \end{aligned}$$

или

$$\text{ЦИ} = 18,196 - 1,254 \left( \frac{A_T}{100} \right) + 14,34 \left( \frac{A_T}{100} \right)^2 \quad (13)$$

При введении в топливо присадок, улучшающих воспламеняемость, увеличение ЦЧ можно подсчитать по соотношению, [7]:

$$\begin{aligned} \Delta \text{ЦЧ} = & \\ = & 0,17402 \left( \frac{141,5}{\rho} - 131,5 \right)^{1,4444} \times \left( \frac{1,8t_{50} + 32}{100} \right)^{1,0052} \times \\ & \times \ln(1 + 17,534d), \quad (14) \end{aligned}$$

где  $d$  – количество присадки, % об.

Уравнение (14) справедливо в диапазоне  $d = 0,05-0,3$  %. Наиболее точные результаты (абсолютная погрешность не более 5%) получены для топлив, содержащих 0,05-0,15% присадки. По уравнению (14) рассчитывают повышение цетанового числа при добавлении к топливу улучшающей воспламеняемость добавки. Для определения цетанового числа необходимо определить цетановое число «чистого топлива», а затем прибавить к нему величину  $\Delta \text{ЦЧ}$ .

В работе [4] указывается, что при переходе от нормальных парафинов к изомерам величина ЦЧ меняется достаточно сильно. Хотя значения  $t_{50}$ ,  $\rho$ ,  $A_T$  остаются практически неизменными. Поэтому в этих случаях для оценки ЦЧ предлагается учитывать вид углеводородной молекулы, определяемый методом ядерного магнитного резонанса.

В [11] предложен способ определения ЦЧ товарных топлив и топлив с присадками по температуре самовоспламенения капли, за которую принимают наименьшую температуру воспламенения капли при падении ее с высоты 15 см на отполированный, нагретый до соответствующей температуры, стальной диск. Сначала строят зависимость  $t_{\text{воспл.}}$  от состава эталонных смесей цетана с  $\alpha$ -метилнафталином. Затем для испытуемого топлива определяют  $t_{\text{воспл.}}$  и находят % цетана в эталонной смеси, обеспечивающей такую же  $t_{\text{воспл.}}$ , и, соответственно, ЦЧ испытуемого топлива.

Известная оценка дизельных топлив по ЦЧ позволяет качественно прогнозировать их воспламеняемость в дизеле. Количественную оценку действительной воспламеняемости ведут по величине периода задержки воспламенения  $\tau_i(\phi_i)$ . Как известно, в дизеле период задержки воспламенения есть время (угол пкв) от момента начала впрыскивания до момента начала сгорания, который может быть определен по индикаторной диаграмме (ИД) или по резкому усилению свечения или подъёму температуры. На практике в подавляющем большинстве случаев используют определение конца сгорания по ИД, либо как точки момента отрыва кривой давления при сгорании от кривой давления при сжатии (без впрыскивания топлива), либо по первым производным указанных кривых.

По смыслу определения ЦЧ величина  $\tau_i$  уменьшается с ростом ЦЧ, однако характер зависимости меняется для разных типов двигателей, физических свойств топлив и др. Так, по данным [12], полученным на трех

образцах дизелей (полидизель Геркулес D-426 с предкамерой Испано-Сюиза; Континенталь LDS-427 с камерой в поршне типа MAN; одноцилиндровый двигатель Континенталь А-1790-2 с непосредственным впрыскиванием) при испытании 25 образцов топлив выяснили, что величина  $\varphi_i$  с высокой степенью точности коррелирует с ЦЧ ( $R^2 = 0,870-0,95$ ). Так, например, при  $n = \text{const}$  и минимальной нагрузке зависимость  $\varphi_i$  от ЦЧ имеет вид:

$$\varphi_i = 24,46 - 0,325 \text{ ЦЧ} \quad (R^2=0,87), \quad (15)$$

а зависимость  $\varphi_i$  от всех параметров:

$$\varphi_i = 58,85 - 0,161 \text{ ЦЧ} - 0,037(\text{АУ}) - 0,104(\text{ПУ}) - 0,087(\text{ОУ}) + 0,024t_{10} + 0,022t_{50} - 0,097t_{90}, \quad (16)$$

где ( $R^2=0,98$ );

АУ, ПУ, ОУ – соответственно, содержание (% по объему.) ароматических, парафиновых и олефиновых углеводородов.

Таким образом, в данном исследовании получена линейная зависимость  $\varphi_i$  от ЦЧ.

Обработка данных В.А. Корчагина [5], приведенных на рис. 4, дает зависимость:

$$\tau_i \sim \exp(40/\text{ЦЧ}). \quad (17)$$

В большинстве случаев опытные значения периода задержки воспламенения  $\tau_i$  обычно коррелируют известным уравнением периода индукции теплового взрыва:

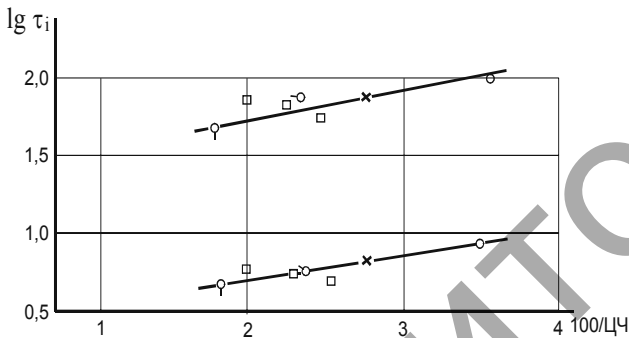


Рисунок 4. Зависимость ЦЧ и периода задержки воспламенения [5].

$$\tau_i = A \times P^{-n} \times e^{B/T}, \quad (18)$$

где  $B = E_{\text{эф}}/R$ ,  $E_{\text{эф}}$  – эффективная энергия активации;

$A, n$  – опытные коэффициенты.

В свое время А.С. Сербиновым было высказано предположение, что это связано с лимитирующей ролью физических процессов с ростом температуры. В работе [13] в качестве основной причины указывается различие действительной температуры в момент начала воспламенения и начальной температуры. Надо отметить, что период индукции теплового взрыва, выражаемый уравнением (18), по смыслу есть время разогрева смеси на характерный интервал  $RT_{\text{нв}}^2/E_{\text{эф}}$ , обеспечивающий дальнейшее прогрессивное самоускорение химической реакции.

Период задержки воспламенения в условиях дизельного впрыскивания определяется экспериментально как время выравнивания давления до его начального значения (в камере  $V = \text{const}$ ) или по отрыву линии давления при сгорании от линии давления при сжатии (в дизеле). Совершенно очевидно, что условия расчета периода индукции не соответствуют условиям опытного определения периода задержки воспламенения. Отсюда следует невозможность описания задержки воспламенения в дизеле единым уравнением типа (18), поскольку величина  $\tau_i$  будет при прочих равных условиях зависеть от геометрии двигателя и динамики собственно процесса сжатия. Видимо, в этом и заключается основная причина большого количества известных из литературы уравнений типа (18), пригодных лишь для одного конкретного типа двигателя.

Использование таких уравнений или более сложных по структуре может быть целесообразно при проведении количественных расчетов для одного типа двигателя с достаточно высокой степенью точности. Так, в [14] приводится аппроксимирующее выражение для  $\varphi_i$  для дизелей типа Даймлер-Бенц

$$\tau_i = \frac{10^3}{6} (0,36 + 0,22Cn) \times \exp \left[ \frac{618840}{\text{ЦЧ} + 25} \left( \frac{1}{8,314T} - \frac{1}{17190} \right) + \left( \frac{21,2}{-12,4} \right)^{0,63} \right]. \quad (19)$$

В [15] дается уравнение для  $\tau_i$  для смеси дизтоплива с этанолом в виде:

$$\tau_i = A e^{E/RT_m}. \quad (20)$$

Для условий при  $P = 3,0$  МПа,  $0 < y < 0,6$ ,  $\varnothing = 0,5$  можно воспользоваться выражениями:

$$E/1000 = 13,91 - 9,089y + 279,5y^2 - 228,4y^3, \quad \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}} \right]$$

$$A = \exp [5,484 + 0,5826y - 31,07y^2 + 25,12y^3] \quad (21)$$

В случае, если  $P = 4,2$  МПа,  $0 < y < 1,0$ ,  $\varnothing = 0,5$  выражения (21) примут вид:

$$E/1000 = 12,36 - 20,62y + 234,8y^2 - 169,5y^3 \quad (22)$$

$$A = \exp [5,23 + 4,353y - 30,65y^2 + 21,26y^3]. \quad (23)$$

Здесь –  $\tau_i$ ,  $A$  определяются в  $10^{-6}$ с;  $R = 8,314$  кДж/кмоль $\times$ К;  $E$  – энергия активации, кДж/моль;  $T_m$  – средняя температура за  $\tau_i$ , К;  $y$  – объемная функция этанола (% по объему);

$\varnothing$  – эквивалентное отношение.

### Выводы

1. Цетановое число – один из важнейших квалификационных показателей дизельного топлива, существенно влияющих на характер рабочего процесса дизеля.

2. Проведенный анализ существующих зависимостей определения цетанового числа и периода задержки воспламенения дизельных топлив позволяет заключить, что в настоящее время отсутствуют единые надежные методы их аналитического определения.

3. Аналитическое определение названных параметров для спиртосодержащих топлив, в том числе топлив с добавками метанола, является еще более проблематичной задачей.

4. Для топлив, содержащих 0,05 – 0,15% присадки, улучшающей воспламеняемость, точность определения цетанового числа и периода задержки воспламенения не превышает 5%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Seromak, D.P., Henein, N.A. Cucle-to-cucle variation with low ignition quality fuels a CFR diesel engine //SAE 790924, 1979.

2. Becker, Klaus. Ein Beitrag zur Cetanzahlmessung an Kohlenwasserstoffen aus dem Benzinbereich. – MTZ, 1976. – 37, № 5. – P. 189-193.

3. Forster, U.I. Der ideal Kraftstoff der Sicht des Tahrzenginjeniers. Teil 1. ATZ, 1982, 84. – № 4. – S. 171-175.

4. Culder, O.L. Cetane number estimation of diesel fuels from carbon type structural composition. SAE Tehn. Pap. Ser. – 1984. – 841341. – P. 57-65.

5. Корчагин, В.А. Исследование процесса испарения распыленных топлив различного состава: дисс.... канд. техн. наук/ В.А. Корчагин. – М., 1969. – 224 с.

6. Серегин, Е.П. Влияние состава топлива на его сгорание в быстроходных дизелях/ Е.П. Серегин, В.Т. Бугай, В.М. Россинский //Химия и технология топлив и масел. – М., 1989. – № 3. – С. 22-24.

7. Букреев, Г.А. Совершенствование рабочего процесса высокооборотного дизеля с открытой каме-

рой сгорания при работе на различных топливах: автореф.... дис. канд. техн. наук/ Г.А. Букреев. – Л.: ЦНИДИ, 1984. – 20 с.

8. Murphy, M.I. An improved cetane number prediction for alternative fuels. – SAE Techn. Pap. Ser., 1983, 831746. – P. 1-11.

9. An improved cetane number prediction for alternative fuels. SAE Tehn. Pap. Ser., № 831746, 1983.

10. Свиридов, Ю.Б. Смесеобразование и сгорание в дизелях/ Ю.Б. Свиридов. – Л.: Машиностроение, 1972. – 224 с.

11. Азев, В.С. лабораторный метод определения цетанового числа дизельного топлива/ В.С. Азев [и др.] //Химия и технология топлив и масел. – 1978. – №1. – С. – 42-44.

12. ASTM Standard Methods for calculated cetane index of distillate fuels //Annual Book of ASTM Standards, 1980.

13. Olson, D.R., Meckel, N.T., Quillian, R.D. The operation of compression ignition engines on wide boiling range fuels. SAE Transactions, vol. 61, 1961. – P. 551-582.

14. Hardenberg, H.O. Thermodynamische Betrachtungen zum Mercedes-Benz Methanol-Gasmotor-Konzept. //Automob. - Ind. – 1983. – № 3. – P. 297-301.

15. Mohamed, N. Saled, Nalim A. Henein. Ignition delay correlations for neat ethanol and ethanol-DF2 blends in a DI diesel engine. – SAE Tehn. Pap. Ser., № 841343, 1984. – P. 113-128.

УДК 636.085.62

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 20.11.2007

## ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫЙ СПОСОБ ОБРАБОТКИ ПЛЮЩЕНОГО ЗЕРНА ЖИДКИМИ РЕАГЕНТАМИ

А.В. Кузьмицкий, докт. техн. наук, доцент (УО БГАТУ), Д.В. Воробьев, аспирант (УО БГСХА)

#### Аннотация

*Приведены данные лабораторных исследований, подтверждающие эффективность применения электронно-ионного способа для нанесения капель распыленного консерванта на плющенное зерно при его закладке на хранение. Доказано, что заряженные капли консерванта обладают большим смачивающим эффектом и большей проникающей способностью, чем не заряженные, что обеспечивает более высокую производительность и исключает потери консерванта при внесении.*

#### Введение

В республике ежегодно убирается свыше четырех миллионов тонн зерна на фуражные цели. Более половины выращенного урожая убирается влажным, что требует значительных энергозатрат на его сушку для последующего хранения. Поиск более простых и дешевых приемов сохранения кормового зерна, которое можно скармливать животным непосредственно во влажном состоянии, является важной и актуальной проблемой для АПК Республики Беларусь.

В настоящее время все большее распространение получает технология консервирования плющеного зерна ранних стадий спелости. Это сравнительно новый, более перспективный способ заготовки фуража. Кроме того, плющение позволяет повысить поедаемость и переваримость зерна. При этом часть сырого протеина и аминокислот преобразовывается в более простые соединения, что улучшает усвоение белка и других питательных веществ.

Обеспечение нормативных сроков хранения плющеного зерна напрямую зависит от качества внесения консерванта. Внесение жидких реагентов