

Características del Chorro de Combustible Cuando al Motor Diesel se lo Adapta para que Trabaje con Aceite de Colza

S. Gusakov¹, P. Vallejo¹, V. Markov², J. Duque³
Cátedra – Termodinámica y motores térmicos¹
Universidad Rusa de la Amistad de los Pueblos (RUDN)¹
Moscú – Rusia¹
Cátedra – Termodinámica y motores térmicos²
Universidad Técnica Estatal de Moscú de nombre N.E. Bauman (MGTU)²
Moscú – Rusia²
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción³
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)³
Guayaquil – Ecuador³
jduque@espol.edu.ec³

Resumen

Se realizaron cálculos-experimentales de investigación sobre el proceso de formación de la mezcla en un motor diesel rápido que trabaja con aceite de colza. Para esto, se realizó una comparación de las propiedades físicas del aceite de colza con las del combustible diesel y se demuestra la influencia de estas propiedades sobre el proceso de formación de la mezcla del motor diesel rápido. Se realizaron cálculos sobre la penetración del chorro de combustible, el diámetro medio de las gotas del combustible pulverizado y el ángulo de apertura del chorro de combustible en el motor diesel, el cual trabaja con combustible diesel y aceite de colza. Así mismo, se presentan resultados de las investigaciones experimentales de los procesos que transcurren en el sistema de alimentación del motor diesel rápido cuando este trabaja con combustible diesel y aceite de colza, demostrando que el tipo de combustible utilizado influye sustancialmente sobre las características de su pulverización en la cámara de combustión.

Palabras Claves: *Aceite de colza, chorro de combustible, motor diesel.*

Abstract

Calculations and experimental research were performed on the process of mixture formation in a fast diesel engine that works with rapeseed oil. A comparison was made of the physical properties of rapeseed oil with those of diesel fuel and the influence of these properties on the formation of the mixture of fast diesel engine was demonstrated. Calculations were made of the penetration of fuel jet, the average diameter of fuel droplets and the opening angle of the fuel jet in the diesel engine, which works with diesel fuel and rapeseed oil. Also, results are presented of experimental investigations of the processes that take place in the supply system of the fast diesel engine when it works with diesel fuel and rapeseed oil, showing that the type of fuel used substantially affects the characteristics of the spray formation in the combustion chamber.

Keywords: *Rapeseed oil, fuel jet, diesel engine*

1. Introducción

En los últimos tiempos debido al incremento de los medios de transporte, han adquirido un gran interés los problemas relacionados con el agotamiento de las reservas de combustibles de petróleo y el mejoramiento de los parámetros ecológicos del motor de combustión interna. Uno de los medios para resolver estos problemas es la

utilización de combustibles obtenidos de fuentes renovables, como es el caso del aceite de colza.

La posibilidad de utilizar el aceite de colza en calidad de combustible para los motores diesel se debe a que las propiedades físico-químicas del aceite de colza (densidad, capacidad calorífica, número de cetano y otros) se diferencian en grado poco

significativo de las del combustible diesel [1]. Sin embargo, algunas propiedades (viscosidad, capacidad para formar partículas de carbón, temperatura de congelación) se diferencian sustancialmente respecto a las propiedades del diesel estándar. Por esta razón, la utilización del aceite de colza como combustible para el motor diesel conlleva una serie de problemas relacionados con el conjunto de procesos físicos de su operación. Precisamente de estas propiedades depende la elección de las soluciones y orientaciones para que el motor diesel se adapte mejor al trabajo con aceite de colza. Estas soluciones pueden ser:

- modificación completa del motor diesel con el objetivo de disminuir al máximo las influencias negativas del aceite de colza en el proceso de trabajo del motor diesel;
- modificación parcial de la construcción del motor diesel, la cual permita un gasto mínimo en la adaptación del motor, para que este trabaje con biocombustible;
- mejoramiento de las propiedades físico-químicas del aceite de colza, es decir que éstas se aproximen a las propiedades del combustible diesel.

Cuando se organiza el proceso de trabajo del motor con aceite de colza se le da gran importancia al carácter del transcurso del proceso de trabajo.

Algunas obras científicas relacionadas con el trabajo de la bomba de inyección de alta presión de los motores MD-6, MD-8 [2] y D242 [3] con aceite puro de colza indican que la diferencia en los parámetros de la alimentación de combustible (ángulo de inicio y finalización de la inyección; presión residual; presión máxima de la inyección en el racor del inyector) es insignificante con respecto al trabajo de la bomba con combustible diesel. Por esta razón, se puede suponer que la diferencia de los parámetros del proceso de trabajo del motor se relaciona no con los cambios de los parámetros de la alimentación de combustible si no con las particularidades de los procesos de pulverización, evaporación, formación de la mezcla y combustión del aceite de colza.

Las propiedades físicas que determinan la influencia sobre la dinámica del chorro de combustible y el grado de pulverización son: la viscosidad, la tensión superficial y la densidad. Con el incremento de la densidad, la penetración del chorro del combustible aumenta, esto hace que disminuya parte de la formación de la mezcla volumétrica y conlleva a que una gran cantidad de combustible vaya a parar a las paredes de la cámara de combustión. Con el incremento de la viscosidad del combustible el diámetro medio de las gotas aumenta y la pulverización se vuelve menos homogénea (se incrementa la dispersión de las dimensiones de las gotas). Sin embargo, el ángulo de dispersión del chorro del combustible disminuye y la penetración del chorro se incrementa. Entre mayor sea la tensión

superficial, mayor será la estabilidad de la gota a la influencia de las fuerzas exteriores y mayor será su dimensión. Entre menor sea la tensión superficial, más fina y homogénea será la pulverización del combustible, lo que estimula la aceleración de los procesos de formación de la mezcla y de la combustión.

2. Cálculos y trabajo experimental

Para investigar el proceso de formación de la mezcla de un motor rápido, de pequeña cilindrada y con inyección directa (MD-6, diámetro del cilindro=80mm, carrera del pistón=75mm), el cual forma parte de una estación eléctrica pequeña (AD4-T400W) y que trabaja con aceite puro de colza (aceite que solamente pasó por un proceso de filtración de las impurezas mecánicas), se utilizaron expresiones matemáticas y funciones criterioales expuestas por Lishevskiy A.S. [5] y especificadas por Razleitsebiy N.F. [6], las cuales tienen utilización en los motores rápidos forzados. En estas expresiones entran los parámetros físicos como la densidad ρ_T , la viscosidad dinámica μ_T y la tensión superficial σ_T . Es importante indicar que los parámetros ρ_T , μ_T y σ_T del aceite de colza (Tabla 1) prácticamente no sobrepasan los límites máximos de los valores con los cuales fueron obtenidas las funciones criterioales. Estos valores para los combustibles líquidos varían entre los límites: $\rho_T = (0,7 \dots 0,93) \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$; $\mu_T = (0,4 \dots 89,7) \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$; $\sigma_T = (22 \dots 30,7) \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$ [5].

Tabla 1. Propiedades físicas de los combustibles

Propiedades físicas del combustible	Tipo de combustible	
	Combustible diesel	Aceite de colza
Densidad del combustible $\rho_T, \text{ kg/m}^3$	830	916
Viscosidad dinámica $\mu_T, \text{ Pa}\cdot\text{s}$	$3,154 \cdot 10^{-3}$	0,0687
Tensión superficial $\sigma_T, \text{ N/m}$	$27,1 \cdot 10^{-3}$	$33,2 \cdot 10^{-3}$

Más adelante, están expuestas las expresiones matemáticas con las que se determinaron las características de inyección del combustible y las funciones criterioales para la investigación del proceso de formación de la mezcla:

2.1. Influencia de los parámetros del combustible sobre la penetración del chorro (l_T)

La velocidad media de la corriente de combustible por el orificio (tobera) de pulverización del inyector en

el transcurso de la inyección del suministro cíclico del combustible

$$U_0 = \frac{q}{\mu f_c \cdot i_c \cdot \rho_T \cdot \tau_{iny}} \quad (1)$$

Donde q – suministro cíclico del combustible, kg.;

$d_c = 3,65 \cdot 10^{-4}$ m – diámetro de la tobera del inyector;

$\mu = 0,8$ – coeficiente de contracción;

$f_c = 1,05 \cdot 10^{-7}$ – superficie de una tobera del pulverizador, m²;

$\mu f_c = 8,37 \cdot 10^{-4}$ – superficie efectiva de la sección de estrangulamiento de un orificio de pulverización del inyector, m²;

$i_c = 3$ – cantidad de las toberas del pulverizador;

$\tau_{iny} = \frac{\varphi_{iny}}{6 \cdot n}$ – duración de la inyección de la porción de combustible, s.

φ_{iny} – duración de la inyección, en grados de rotación del eje de levas (°GRL)

n – frecuencia de rotación del eje de levas, min-1.

En las fórmulas para el cálculo de los parámetros del chorro del combustible pulverizado se utilizan los siguientes criterios:

- Criterio Weber, que caracteriza la relación entre las fuerzas de la tensión superficial con las de inercia,

$$W_e = \frac{U_0^2 \cdot d_c \cdot \rho_T}{\sigma_T} \quad (2)$$

- criterio M, que caracteriza la relación entre la tensión superficial y la viscosidad

$$M = \frac{\mu_T^2}{\rho_T \cdot d_c \cdot \sigma_T} \quad (3)$$

- relación entre la densidad del aire con la del combustible,

$$\rho = \frac{\rho_a}{\rho_T} \quad (4)$$

Donde $\rho_a = 16$ kg/m³ – densidad del aire en el cilindro del motor MD-6.

La expresión para determinar la penetración del chorro del combustible se expresa de la siguiente forma

$$l_T = \left(\frac{d_c \cdot U_0 \cdot W_e^{0,21} \cdot M^{0,16}}{D_f \cdot \sqrt{2} \cdot \rho} \right)^{0,5} \cdot (\tau_{iny})^{0,5} \quad (5)$$

donde $D_f = 3$ – coeficiente empírico.

Las investigaciones de las características de inyección del combustible y de los procesos de formación de la mezcla se realizaron conforme a la cámara de combustión del motor diesel MD-6, el esquema de la cual esta representado en la fig. 1.

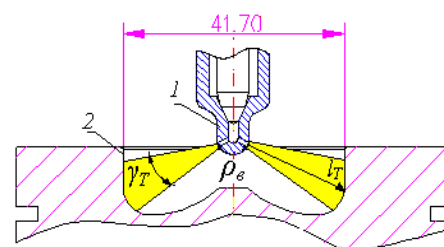


Figura 1. Cámara de combustión del motor MD-6 y parámetros del chorro del combustible pulverizado: 1- pulverizador del inyector; 2 – paredes de la cámara de combustión.

2.2. Influencia de los parámetros del combustible sobre el grado de pulverización (d_κ)

La ecuación criterial para encontrar el diámetro medio de las gotas en el chorro de combustible se escribe de la siguiente manera

$$d_\kappa = E_k \cdot d_c \cdot (\rho \cdot W_e)^{-0,266} \cdot M^{0,0733} \quad (6)$$

Donde $E_k = 3,01$ – coeficiente, que depende de la construcción del inyector y del método como se determinó el promedio de las dimensiones de las gotas.

2.3. Influencia de los parámetros del combustible sobre el ángulo de apertura del chorro de combustible (γ_T)

La ecuación criterial para determinar el ángulo de apertura chorro de combustible se la escribe de la siguiente manera

$$\gamma_T = 2 \arctg \left(F_s \cdot W_e^{0,32} \cdot M^{-0,07} \cdot \rho^{0,5} \right), \quad (7)$$

Donde $F_s = 0,009$ – coeficiente.

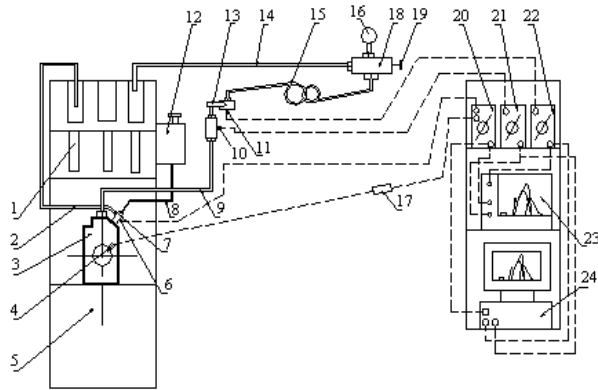


Figura 2. Esquema del banco de pruebas para el trabajo de investigación del sistema de inyección diesel: 1 – vasos graduados; 2 – tubería para el regreso de combustible; 3 – bomba de alta presión; 4 – sensor que señala el ángulo de posición del eje de levas; 5 – banco de pruebas; 6 – sensor que determina la presión en la cavidad de presión baja; 7 – racor; 8 – tubería de baja presión; 9; 14 – tubería de alta presión; 10 – sensor para determinar la presión en el racor del inyector; 11 – sensor, que registra la característica de inyección; 12 – tanque de combustible; 13 – inyector; 15 – tubería calibrada; 16 – manómetro; 17 – divisor de tensión; 18 – volumen con amortiguación; 19 – llave de aguja; 20; 21; 22 – amplificador; 23 – oscilógrafo; 24 – computador.

La duración de la inyección (φ_{iny}) se determinó experimentalmente en el banco de pruebas (Fig. 2), el cual fue dotado con aparatos de control y medición. Para imitar las condiciones de alimentación del combustible en el motor diesel MD-6, el combustible a la bomba de inyección 3 de alta presión ingresó por gravedad del tanque 12 (Fig. 2), el cual fue montado a un nivel más alto que el de la bomba (0,3 m). Para crear una contrapresión fuera del inyector, que sea parecida a la presión en el cilindro del motor durante la inyección del combustible se utilizó una llave aguja 19, que se la ubicó en un volumen con amortiguación que tiene un manómetro 16. De esta forma, el sistema fue regulado a una presión de 4,0 MPa, la que corresponde a la presión en el cilindro del motor al final del proceso de compresión.

Para determinar las características de la inyección se utilizó la metodología [4], que se basa en el registro de la presión en la tubería calibrada 15 (Fig. 2). En la Figura 3 se muestran dos de los oscilogramas de la característica de inyección a una frecuencia de rotación del eje de levas de la bomba de inyección de alta presión (1500 min^{-1}) y con un suministro cíclico de combustible de $q=16 \text{ mm}^3$.

Las investigaciones de las características de inyección para el sistema original de alimentación del motor MD-6 que trabaja con combustible diesel o con aceite puro de colza se realizaron para todo el rango del suministro de combustible y para distintas revoluciones del eje de levas de la bomba ($900, 1200, 1500 \text{ min}^{-1}$). Los resultados están expuestos en la Fig. 4.

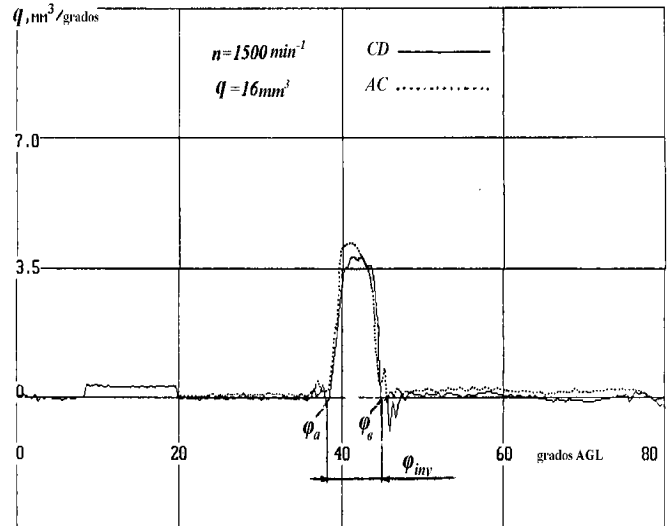


Figura 3. Oscilograma de la característica de inyección. φ_a – Ángulo de inicio de la inyección; φ_b – Ángulo de culminación de la inyección; φ_{iny} – duración de la inyección. CD – combustible diesel; AC – aceite de colza; AGL – ángulo de giro del eje de levas

3. Resultados

Los resultados obtenidos experimentalmente demostraron, que el ángulo de inicio de la inyección para el combustible diesel y el aceite de colza son prácticamente iguales para los regímenes con distintas revoluciones del eje de levas de la bomba ($900, 1200, 1500 \text{ min}^{-1}$) y distintos suministros de combustible (fig. 4). Como se ve de los resultados de las Figs. 3 y 4, la duración de la inyección φ_{iny} se prolonga, esto se debe a que, la compresibilidad del aceite de colza es menor y su viscosidad es mayor con respecto del combustible diesel. Como resultado de lo antes mencionado, con un ángulo prácticamente invariable del inicio de la inyección de combustible φ_a la culminación de la inyección ocurre con un atraso de $0,6-0,8^\circ$ AGL cuando se utiliza aceite de colza, con respecto al combustible diesel (ángulo de culminación de la inyección φ_b se incrementa). Esta tendencia se conserva para todos los regímenes investigados de velocidad (para las revoluciones del eje de levas de la bomba de alta presión $900, 1200, 1500 \text{ min}^{-1}$).

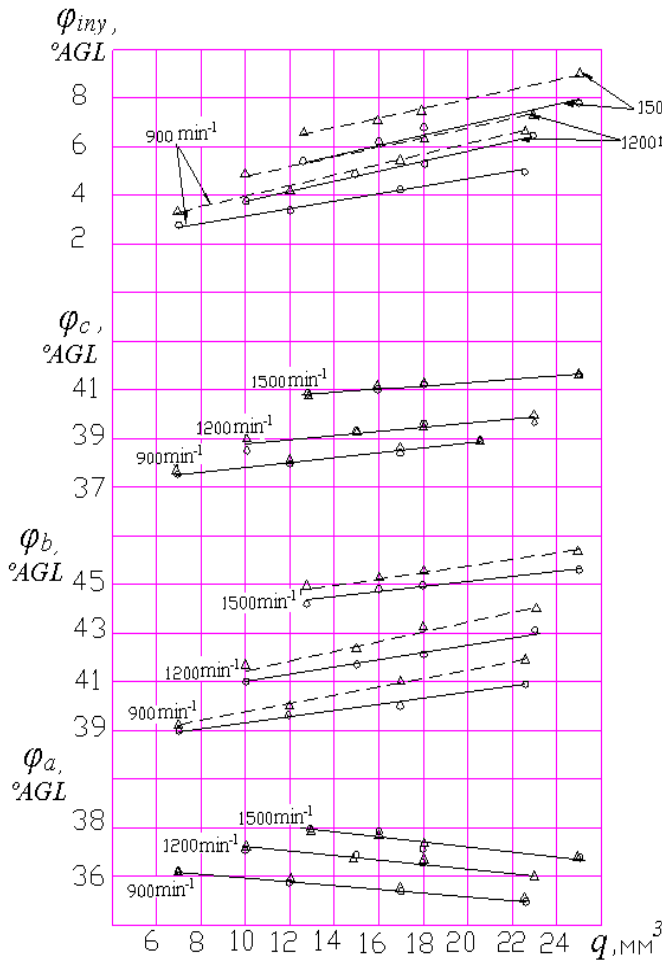


Figura 4. Características de inyección de la bomba de combustible de alta presión del motor diesel MD-6
 φ_c - ángulo en que alcanza la velocidad máxima el suministro de combustible

Combustible diesel \circ ————— \circ
 Aceite de colza \triangle - - - - - \triangle

Los resultados del cálculo de la penetración del chorro de combustible, el diámetro medio de las gotas del combustible pulverizado y el ángulo de apertura del chorro de combustible, que son formados por el equipo de inyección del motor diesel MD-6, con combustible diesel y aceite de colza están mostrados en las Fig. 5, 6, 7, respectivamente. Los resultados demuestran que cuando el motor diesel que trabaja con combustible diesel pasa a trabajar con aceite de colza en el régimen de $n=1500 \text{ min}^{-1}$ y $q=16 \text{ mg}$ la penetración del chorro de combustible aproximadamente se alarga en 1,5, el diámetro de la gota aumenta 2 veces, el ángulo de apertura del chorro de combustible, por el contrario, disminuye 2 veces.

Como se ve en la Fig. 5 la penetración del chorro de combustible para el aceite de colza es mayor que para el combustible diesel. Este carácter se conserva para las distintas frecuencias de rotación del eje de levas y para todo el rango de los suministros de

combustible. Este aumento de la longitud del chorro del combustible pulverizado puede conllevar a que, durante el periodo de retardo de la inflamación una cantidad grande del aceite de colza caiga en las paredes de la cámara de combustión. Debido a esto, puede incrementarse la presencia de humos en los gases de escape, no por el efecto de la diferencia de la composición química del combustible y de la cinética de las reacciones químicas de la combustión, si no por el efecto de que en las zonas de la pared empeora el ingreso de oxígeno al combustible respecto del que ingresa en el centro (volumen) de la cámara de combustión.

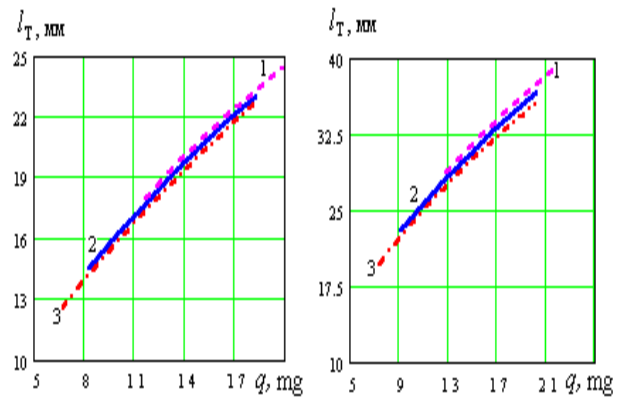


Figura 5. Penetración del chorro de combustible
 a – combustible diesel; b – aceite de colza
 1 – $n=1500 \text{ min}^{-1}$; 2 - $n=1200 \text{ min}^{-1}$; 3 - $n=900 \text{ min}^{-1}$.

Los resultados expuestos en la Fig. 6 demuestran que, el diámetro medio de la gota del aceite de colza pulverizado es mayor que cuando se utiliza combustible diesel. Esta es una de las causas principales del aumento de la penetración del chorro pulverizado del aceite de colza con respecto al combustible diesel. En este caso, cuando la longitud del chorro pulverizado de combustible no sobrepasa las dimensiones geométricas de la cámara de combustión, el empeoramiento del proceso de evaporación de las gotas más grandes del aceite de colza y el proceso de la formación de la mezcla de alguna manera se recompensa con el aumento de la penetración del chorro de combustible para el aceite de colza.

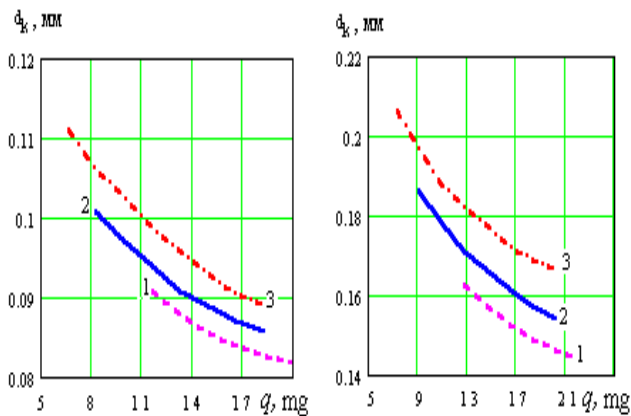


Figura 6. Diámetro medio de la gota del combustible pulverizado.
a – combustible diesel; b – aceite de colza
1 – $n=1500 \text{ min}^{-1}$; 2 – $n=1200 \text{ min}^{-1}$; 3 – $n=900 \text{ min}^{-1}$.

Los resultados representados en la Fig. 7 demuestran, que el ángulo de apertura del chorro pulverizado del aceite de colza y por consiguiente su superficie lateral es menor que la del chorro pulverizado del combustible diesel. Esta circunstancia (tomando en cuenta que la diferencia del número de cetano del aceite de colza y del combustible diesel no es muy grande) produce una disminución de la cantidad evaporada del aceite de colza durante el periodo de retardo de inflamación lo que conlleva a un proceso de trabajo del motor más “suave”. Así mismo se puede añadir que, la disminución del ángulo de apertura del chorro del aceite de colza permite incrementar la cantidad de las toberas en el pulverizador sin que se produzca la intersección mutua de los chorros de combustible, que son formados en las toberas vecinas, y así mismo permite intensificar el movimiento giratorio de la carga de aire. Esto, en resumidas cuentas puede reflejar en una forma positiva en la economía de combustible. Sin embargo, debido a la existencia de resinas en el aceite de colza puede producir la formación de depósitos de sarro e intensificar la carbonización de las toberas del pulverizador, disminuyendo su diámetro. Por esta razón, para valorar el carácter racional de la utilización de pulverizadores con un número más grande de toberas y por consiguiente con diámetros más pequeños en el motor diesel que trabaja con aceite de colza, es necesario realizar investigaciones experimentales adicionales en el motor diesel rápido, de pequeña cilindrada y con inyección directa.

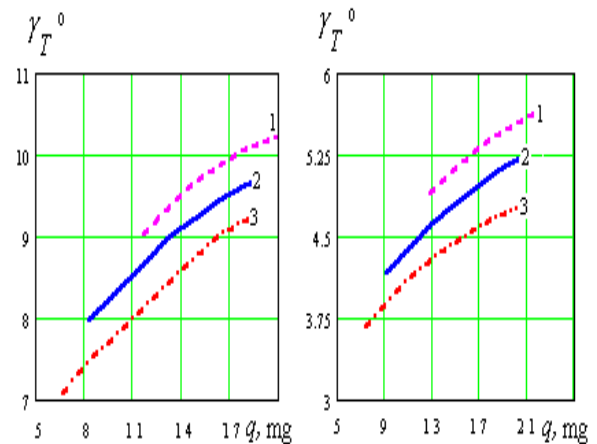


Figura 7. Ángulo de apertura del chorro de combustible.
a – combustible diesel; b – aceite de colza
1 – $n=1500 \text{ min}^{-1}$; 2 – $n=1200 \text{ min}^{-1}$; 3 – $n=900 \text{ min}^{-1}$.

4. Conclusiones

Las investigaciones realizadas permitieron hacer las siguientes conclusiones:

Para el análisis de los procesos de pulverización del aceite puro de colza en los motores diesel rápidos intensificados se puede utilizar las expresiones matemáticas y funciones criterioles expuestas por Lishevskiy A.S. [5] y especificadas por Razleitsebiy N.F. [6]

Para mejorar la exactitud de los cálculos es mejor determinar la duración de la inyección experimentalmente en el banco de pruebas, el cual fue dotado con aparatos de control, medición y con un mecanismo para imitar las condiciones que surgen en la cámara de combustión.

Los resultados experimentales de las características de inyección demostraron que para los regímenes con distintas revoluciones del eje de levas de la bomba de inyección de alta presión y con distintos suministros de combustible, los ángulos de inicio de la inyección para el combustible diesel y el aceite de colza son prácticamente iguales, la duración de la inyección cuando el motor diesel trabaja con aceite de colza se prolonga y la culminación de la inyección ocurre con un atraso.

Los cálculos demostraron que cuando el motor diesel pasa a trabajar con aceite de colza la penetración del chorro de combustible aproximadamente se alarga en 1,5, el diámetro medio de la gota aumenta 2 veces, el ángulo de apertura del chorro de combustible, por el contrario, disminuye 2 veces. Esto sin duda influye sobre las características de trabajo del motor.

De acuerdo con lo demostrado en este trabajo se puede concluir, que el tipo de combustible utilizado influye sustancialmente sobre las características de su

pulverización en la cámara de combustión, lo que conduce a llevar a cabo las investigaciones experimentales con el objetivo de elegir los parámetros de alimentación de combustible para la adaptación del motor diesel que va a trabajar con combustible alternativo, es decir aceite de colza.

proceso de combustión del motor diesel. Editado en Xarkov en la editorial Vishaya shkola, 1980. 168 pp.)

5. Referencias

- [1] Гайворонский А.И., Марков В.А, Илатовкий Ю.В. Использование природного газа и других альтернативных топлив в дизельных двигателях. –М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2007. – 480 с. (Gaivorovskiy A.N. y otros. *Utilización del gas natural y otros combustibles alternativos en los motores diesel*. Editado en Moscú en la editorial GASPROM, 2007, 480 pag.)
- [2] Вальехо П., Пономарев В.Е. Экспериментальные исследования влияние вязкости топлива на характеристики впрыска // Проблемы теории и практики в инженерных исследованиях: Сб. научных трудов. –М. : Изд-во АСВ, 1998. - С. 207-209. (Vallejo Pablo, Ponomarov V.E. *Investigaciones experimentales de la viscosidad del combustible sobre las características de inyección*. Trabajos científicos. Editado en Moscu en la editorial АСВ, 1998. pp. 207-209)
- [3] Исследования рабочего процесса тракторного дизеля при работе на смеси дизельного топлива и рапсового масла /Басистый Л.Н., Луай Ахмед, Олесов И.Ю., Шкаликова В.П. // Вестник РУДН. Серия: Тепловые двигатели. - 1996. - №1. - С. 30-36. (*Investigaciones del proceso de trabajo del motor diese con la mezcla de combustible diesel con aceite de colza*. Basistiy L.N. y otros. //Boletín informativo de la Universidad Rusa de la Amistad de los pueblos. Serie Maquinas térmicas. – 1996.- №1. pp. 30-36)
- [4] Bosch Wilhelm/ Der Einspritzgezetz-indikator, ein neues leßgerat zur direkten Bestimmung des Einspritzgesetzes von Einzelinspritzungen. Motortechn. Z. - 1964, 25. - №7. – s. 268-282. (Bosch Wilhelm/ *Nuevo método de investigación de la característica de inyección por medio del indicador de alimentación*. Motortechn. Z. - 1964, 25. - №7. – pp. 268-282)
- [5] Лышевский А.С. Распыливание топлива в судовых дизелях. - Л.: Судостроение, 1971. – 318с. (Lishevskiy A.S. *Pulverización del combustible en los motores diesel*. Editado en Leningrado en la editorial Sudostroenie, 1971. – 318 pp.)
- [6] Разлейцевый Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. Харьков. Высшая школа, 1980. 168 с. (Razleitsebiy N.F. *Modelación y optimización del*