

УДК 536.46

## ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ МУЛЬТИКОМПОНЕНТНЫХ БИОТОПЛИВ

А. К. Копейка<sup>1</sup>, В. В. Головкин<sup>1</sup>, А. Н. Золотко<sup>1</sup>, Д. С. Дараков<sup>1</sup>, В. М. Любарский<sup>2</sup>,  
Л. Раславичус<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт горения и нетрадиционных технологий,  
Одесский национальный университет имени И.И.Мечникова, Одесса, Украина, kopyuka@onu.edu.ua*  
<sup>2</sup> *Институт сельскохозяйственной инженерии,  
Литовский сельскохозяйственный университет, Каунас, Литва, vliuba@mei.lt*

Интерес к исследованию процессов воспламенения и горения биотоплив обусловлен несколькими объективными причинами, главная из которых, – это ограниченность запасов ископаемых топливных ресурсов на фоне растущих темпов их потребления, и связанное с этим ухудшение экологической обстановки на планете. В транспортном сегменте экономики, перспективы замены традиционных видов топлив на их биологические аналоги связаны, в первую очередь, с биоэтанолами, метиловыми эфирами растительных масел. Очевидно, что простая замена традиционных топлив на биотоплива, с иными, как химическими, реологическими так и теплофизическими свойствами, в существующих моторных агрегатах не могло не сказаться на эффективности их работы. Один из основных недостатков, – увеличение удельного расхода биотоплив, на фоне их более высокой себестоимости по сравнению с минеральными горючими. В докладе приводятся результаты исследований влияния теплофизических свойств биотоплив и их смесей с минеральным дизельным топливом, на величину периода задержки воспламенения этих горючих. Анализ полученных данных, позволил определить состав топливной смеси, для оптимальной работы двигателя.

### ВВЕДЕНИЕ

Динамика процесса воспламенения топлива в камере сгорания дизельного двигателя во многом определяется соотношением величины периода задержки воспламенения топлива  $\tau_{ind}$ , и полного времени  $\tau_{total}$  от начала впрыскивания топлива до окончания его горения в конце рабочего цикла. Чем меньше период задержки воспламенения топлива  $\tau_{ind}$ , в сравнении с  $\tau_{total}$ , тем более плавно, и спокойно сгорает топливо. Тем самым обеспечивается более равномерное нарастание давления в рабочем цилиндре дизельного двигателя, и соответственно его плавная работа. Значение  $\tau_{ind}$ , однако, не может быть слишком малым, и должно соответствовать индикаторной диаграмме двигателя. Напротив, при относительно большой величине периода задержки воспламенения топлива  $\tau_{ind}$ , в рабочем объеме цилиндра дизельного двигателя, еще до начала воспламенения скапливается большая часть испаренных паров топлива. Быстрое сгорание такой паро-воздушной смеси приводит к очень резкому увеличению давления в камере сгорания, и как следствие к более жесткой работе двигателя. Кроме того, увеличение  $\tau_{ind}$ , является одной из причин неполного сгорания горючего, и как следствие увеличения его расхода, что наиболее актуально при работе двигателя на пусковых и высокооборотных режимах.

Еще одним важным параметром при воспламенении дизельного топлива является его предельная температура воспламенения  $T_{\infty,кр}$ . Кроме непосредственного влияния на пусковые характеристики двигателя, снижение критического значения этой величины должно приводить к повышению полноты сгорания топлива при запуске двигателя, вследствие уменьшения количества топлива, успевающего за время индукции  $\tau_{ind}$  пройти стадию низкотемпературной деструкции. Это в свою очередь, не только облегчает запуск двигателя, но и обеспечивает более быстрый выход двигателя на устойчивый режим работы.

Таким образом, при замене минерального дизельного топлива на биотопливо, следует особое внимание обращать на величину периода задержки воспламенения этих топлив  $\tau_{ind}$ .

Отклонение от его стандартного значения как в одну, так и в другую сторону, приведет к неэффективному сгоранию биотоплив в существующих дизельных агрегатах. Поскольку, как показано в [1], биотоплива не являются в отношении значений  $\tau_{ind}$ ,  $\tau_{total}$  и  $T_{сжр}$  полными аналогами минерального дизельного топлива, то на первый план выступает задача о поиске биотопливных смесей с близкими к стандартным значениями указанных параметров. Исследования процессов воспламенения и горения чистых биотоплив сохраняют свою актуальность и для разработки новых дизельных двигателей, работающих исключительно на биотопливе.

В настоящей работе представлены результаты исследований влияния добавок дигидрированного биоэтанола (А), рапсово-метилового эфира (РМЭ) к минеральному дизельному топливу (ДТ), на длительность предвоспламенительного периода при горении двух- и трехкомпонентных смесей этих горючих, величину удельного расхода топливных смесей, содержание оксидов азота и углерода в их продуктах сгорания.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ КАПЛИ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА. КВАЗИСТАЦИОНАРНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ.

Расчет  $\tau_{ind}$  – времени задержки воспламенения одиночных капель топлив, а также топливных смесей проводился в рамках известной квазистационарной модели инертного прогрева капли [2]. Основными положениями, принятыми в этой модели было следующее: выгорания паров топлива до момента воспламенения не происходит; критерий Нуссельта равен 2 ( $Nu=2$ ); время тепловой и концентрационной релаксации в окрестности капли бесконечно мало (квазистационарное приближение); критерий Льюиса равен 1 ( $Le=1$ ) т.е поля концентрации и температуры подобны; температура капли постоянна по радиусу в любой момент времени; все теплофизические величины не зависят от температуры. Одним из главных результатов, полученных в рамках данной модели, было выражение для расчета  $\tau_{ind}$  величины задержки воспламенения одиночной капли горючего. Несколько модифицированное в [3] это выражение имеет вид:

$$\tau_{ind} = \frac{\rho c_p^{liq} r_0^2}{3\lambda^{gas}} \ln \left( \frac{T_\infty - T_0}{T_\infty - T_b} \right) . \quad (1)$$

Здесь,  $r_0$  – начальный радиус капли;  $\rho$  - плотность жидкости;  $c_p^{liq}$  - удельная теплоемкость жидкости;  $\lambda^{gas}$  – коэффициент теплопроводности паров жидкого топлива;  $T_0$  – температура капли в начальный момент времени;  $T_b$  - температура кипения топлива;  $T_\infty$  – температура окружающей среды.

Как видно из анализа выражения (1), для расчета  $\tau_{ind}$  необходимо знать плотность  $\rho$ , теплоемкость  $c_p^{liq}$  жидкой фазы, температуру кипения  $T_b$ , а также коэффициент теплопроводности паров топлива  $\lambda^{gas}$ . Остальные величины, входящие в эту формулу, а именно, начальные радиус и температура капли, температура окружающей среды являются параметрами задачи. Таким образом, изменяя теплофизические свойства жидкой фазы и паров топлива, можно влиять на величину периода задержки воспламенения.

В расчетах принималось  $r_0=1,125$ мм;  $T_0=293$ К. Данные по остальным величинам, входящих в это выражение приведены в таблице 1. Поскольку большая часть экспериментальных данных по теплофизическим свойствам ДТ и РМЭ в литературе отсутствовали, их значения были найдены из расчетов по известным методам [6-8].

Данные необходимые для расчетов времени задержки воспламенения капель смесей ДТ, РМЭ с этанолом А приведены в таблице 2. При этом принималось, что плотность и удельная теплоемкость жидкой фазы исследуемых топливных смесей подчиняется закону аддитивности, а мольные доли пропорциональны содержанию в объемных процентах. Расчет теплопроводности газовой смеси выполнялся по формуле Васильевой [8].

Таблица 1

Теплофизические свойства углеводородных топлив (дизельное топливо (ДТ), рапсово-метиловый эфир (РМЭ), этанол (А))

	ДТ	РМЭ	А
Химическая формула	$C_{16}H_{34}$	$C_{19}H_{36}O_2$	$C_2H_5OH$
Молекулярная масса	226,430	292,000	46,069
Плотность жидкости $\rho, \text{кг/м}^3$ (при $T=293\text{K}$ )	860	900	791
Удельная теплоемкость жидкости $c_p, \text{кДж/кг} \cdot \text{K}$ ( $\text{кал/г} \cdot \text{град}$ ) при $T=293\text{K}$	1,800 (0,431)	1,670 (0,400)	2,399 (0,574) [4]
Критическая температура $T_{cr}, \text{K}$	739,4 [6] 737,6 [7]	716,5 [9] 755 [10]	514,0 [11]
Критическое давление $P_{cr}, \text{МПа(атм)}$	1,9(19,37) [7] 2,3(23,45) [7]	1,236(12,6) [10]	6,384(65,1) [4]
Динамическая вязкость паров $\mu, \text{Па} \cdot \text{с(нз)}$ (при $T=288\text{K}$ )	$5,43 \cdot 10^{-6}$ ( $5,43 \cdot 10^{-5}$ )	$4,54 \cdot 10^{-6}$ ( $4,54 \cdot 10^{-5}$ ) [12] $4,21 \cdot 10^{-6}$ ( $4,21 \cdot 10^{-5}$ ) [13]	$7,85 \cdot 10^{-6}$ ( $7,85 \cdot 10^{-5} \text{нз}$ ) при $T=273\text{K}$ [4]
Удельная теплоемкость пара $c_p, \text{кДж/кг} \cdot \text{K}$ ( $\text{кал/г} \cdot \text{град}$ ) при $T=293\text{K}$	1,504 (0,360) [14] 1,363 (0,326) [15]	1,252 (0,299) [15]	1,415(0,339) при $T=273\text{K}$ [4]
Молярная теплоемкость пара $C_p, \text{Дж/моль} \cdot \text{K}$ ( $\text{кал/моль} \cdot \text{град}$ ) при $T=293\text{K}$	340,55 (81,47) 308,62 (73,83)	365,58 (87,31)	65,21(15,60) при $T=273\text{K}$ [11]
Теплопроводность насыщенного пара $\lambda, \text{Вт/м} \cdot \text{K}$ ( $\text{кал/см} \cdot \text{с} \cdot \text{град}$ ) при $T=293\text{K}$	$95,72 \cdot 10^{-4}$ ( $2,29 \cdot 10^{-5}$ ) [16]	$66,28 \cdot 10^{-4}$ ( $1,59 \cdot 10^{-5}$ ) [16] $64,35 \cdot 10^{-4}$ ( $1,54 \cdot 10^{-5}$ ) [17]	$148,62 \cdot 10^{-4}$ ( $3,56 \cdot 10^{-5}$ ) [4]
Температура кипения при $p=1\text{атм}$ $T_b, \text{K}$ ( $t_b, \text{°C}$ )	453-633 (180-360) [5]	610 (337)	351,45 (78,3) [4]

Принимая во внимание, что зависимость времени задержки воспламенения капли топлива от температуры его кипения  $\tau_{ind}(T_b)$  подчиняется относительно слабому логарифмическому закону, расчет  $T_{b,mix}$  для двух и трех – компонентной смеси топлив носил оценочный характер. Значение температуры кипения топливных смесей ДТ, РМЭ и А восстанавливалось по величине псевдокритической температуры исследуемой смеси  $T_{ps.cr}$ , которая в свою очередь определялась по методу Кея [18]. Как отмечается в [18], этот простой и широко используемый метод, в большинстве случаев дает удовлетворительные результаты. В соответствии с этим методом:

$$T_{ps.cr} = \sum_{i=1}^n x_i T_{cr,i} \quad (2)$$

где  $x_i$  – мольная доля компонента равная его объемному проценту;  $T_{cr,i}$  – критическая температура  $i$ -го компонента смеси.

Результаты расчетов значения критической температуры для ДТ и РМЭ представлены в таблице 1. В этой же таблице приведены данные по критической температуре этанола (А) [11]. Значения  $T_{ps.cr}$ , полученные с помощью выражения (2), в зависимости от состава смеси приведены в таблице 2.

Таблица 2

## Теплофизические свойства жидких топлив и их смесей

Содержание в объемных процентах топлив	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p^{liq}, \text{Дж/кг} \cdot \text{К}$	$\frac{\lambda^{gas}, 10^{-4} \text{Вт/м} \cdot \text{К}}{\lambda^{gas}, 10^{-5} \text{Кал/см} \cdot \text{град} \cdot \text{с}}$ при $T = 293\text{К}$	$T_{ps.cr}, \text{К}$	$T_{b.mix}, \text{К}$
100%ДТ	860,0	1800,3	95,72/2,290	739,4	553,0
100%РМЭ	900,0	1670,0	66,28/1,586	755,0	610,0
100%А	791,0	2439,8	148,6/3,555	514,0	351,5
100%ДТ+2,5%А	858,3	1815,9	96,64/2,312	733,9	547,9
100%ДТ+5%А	856,7	1830,8	97,56/2,334	728,7	543,1
100%ДТ+7%А	855,5	1842,1	98,23/2,350	724,7	539,3
100%ДТ+10%А	853,7	1858,4	99,28/2,375	718,9	533,9
100%РМЭ+2,5%А	897,3	1688,8	67,34/1,611	749,1	562,1
100%РМЭ+5%А	894,8	1706,7	68,22/1,632	743,5	556,9
100%РМЭ+7%А	892,9	1720,4	68,93/1,649	739,2	552,8
100%РМЭ+10%А	890,1	1740,0	69,93/1,673	733,1	547,2
90%ДТ+10%РМЭ	864,0	1787,3	92,17/2,205	741,0	554,5
70%ДТ+30%РМЭ	872,0	1761,2	85,56/2,047	744,1	557,4
50%ДТ+50%РМЭ	880,0	1735,2	79,55/1,903	747,2	560,3
90%ДТ+10%РМЭ+2,5%А	862,2	1803,2	93,13/2,228	735,4	549,3
90%ДТ+10%РМЭ+5%А	860,5	1818,3	94,01/2,249	730,2	544,5
90%ДТ+10%РМЭ+7%А	859,2	1830,0	94,72/2,266	726,1	540,6
90%ДТ+10%РМЭ+10%А	857,4	1846,6	95,72/2,290	720,3	535,2
70%ДТ+30%РМЭ+2,5%А	870,0	1777,8	86,48/2,069	738,5	552,2
70%ДТ+30%РМЭ+5%А	868,1	1793,5	87,40/2,091	733,1	547,2
70%ДТ+30%РМЭ+7%А	866,7	1805,6	88,11/2,108	729,0	543,3
70%ДТ+30%РМЭ+10%А	864,6	1822,9	89,12/2,132	723,2	537,9
50%ДТ+50%РМЭ+2,5%А	877,8	1752,3	80,47/1,925	741,5	555,0
50%ДТ+50%РМЭ+5%А	875,8	1768,7	81,34/1,946	736,1	550,0
50%ДТ+50%РМЭ+7%А	874,2	1781,2	82,05/1,963	731,9	546,0
50%ДТ+50%РМЭ+10%А	871,9	1799,2	83,06/1,987	726,0	540,5

На рис.1а-е представлены данные расчета времени задержки воспламенения капли ДТ, РМЭ и А, а также их смесей в зависимости от температуры окружающей среды  $\tau_{ind}(T_\infty)$ . Как видно из анализа данных представленных на рис.6а-е добавки (А) в (ДТ) и (РМЭ) должны уменьшать время задержки воспламенения капли топливных смесей  $\tau_{ind}$ . Напротив добавки (РМЭ) к (ДТ) увеличивают значение  $\tau_{ind}$ . С ростом концентрации этих добавок подобная тенденция сохраняется.

С целью проверки этого результата были проведены экспериментальные исследования процесса воспламенения одиночных капель ДТ, РМЭ и их смесей с А.

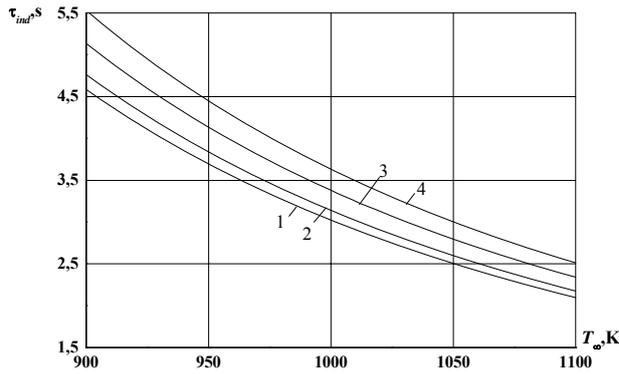


Рис. 1а Зависимость  $\tau_{ind}(T_{\infty})$  для смеси ДТ и РМЭ:  
(1) – 100%ДТ; (2) – 90%ДТ+10%РМЭ; (3) – 70%ДТ+30%РМЭ; (4) – 50%ДТ+50%РМЭ.

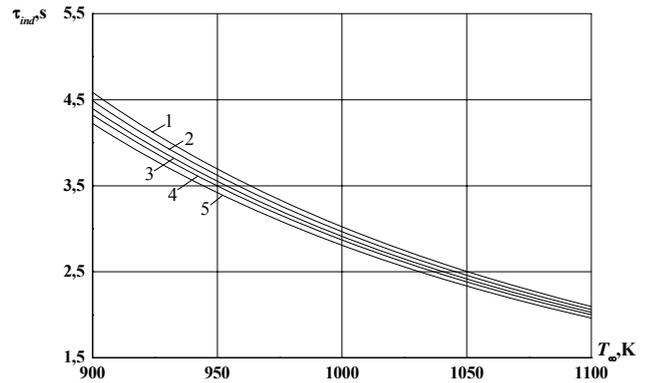


Рис. 1б Зависимость  $\tau_{ind}(T_{\infty})$  для смеси ДТ и А:  
(1) – 100%ДТ; (2) – 100%ДТ+2,5%А; (3) – 100%ДТ+5%А; (4) – 100%ДТ+7%А; (5) – 100%ДТ+10%А.

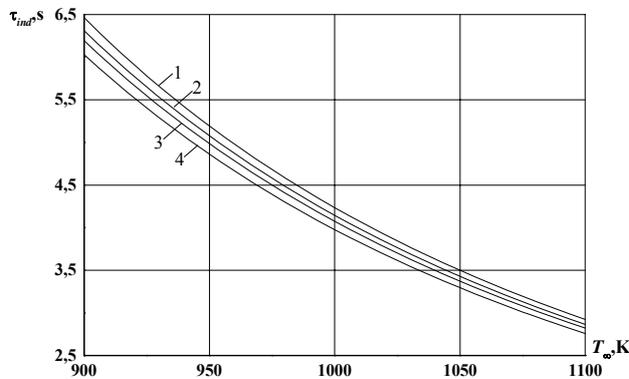


Рис. 1в Зависимость  $\tau_{ind}(T_{\infty})$  для смеси РМЭ и А:  
(1) – 100%РМЭ+2,5%А; (2) – 100%РМЭ+5%А; (3) – 100%РМЭ+7%А; (4) – 100%РМЭ+10%А.

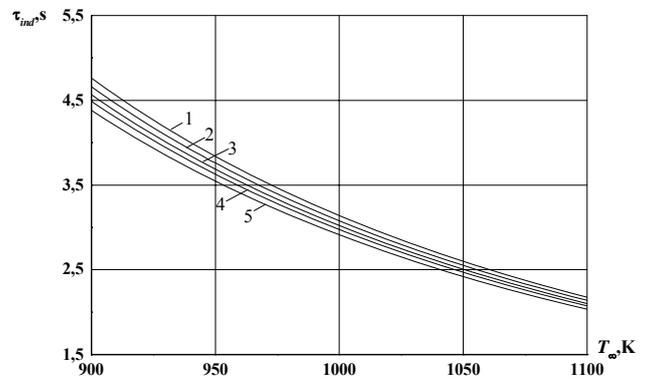


Рис. 1г Зависимость  $\tau_{ind}(T_{\infty})$  для смеси 90%ДТ+10%РМЭ и А:  
(1) – 90%ДТ+10%РМЭ; (2) – 90%ДТ+10%РМЭ+2,5%А; (3) – 90%ДТ+10%РМЭ+5%А; (4) – 90%ДТ+10%РМЭ+7%А; (5) – 90%ДТ+10%РМЭ+10%А.

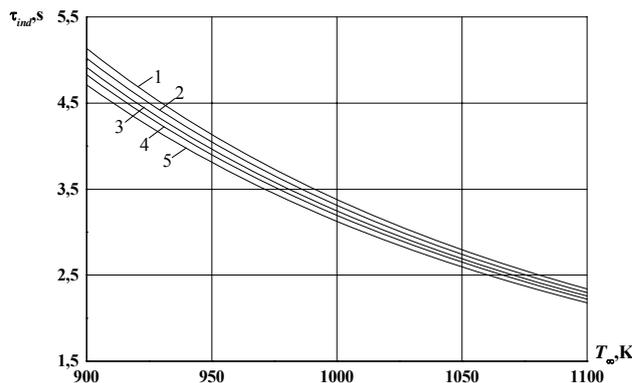


Рис. 1д Зависимость  $\tau_{ind}(T_{\infty})$  для смеси 70%ДТ+30%РМЭ и А:  
(1) – 70%ДТ+30%РМЭ; (2) – 70%ДТ+30%РМЭ+2,5%А; (3) – 70%ДТ+30%РМЭ+5%А; (4) – 70%ДТ+30%РМЭ+7%А; (5) – 70%ДТ+30%РМЭ+10%А.

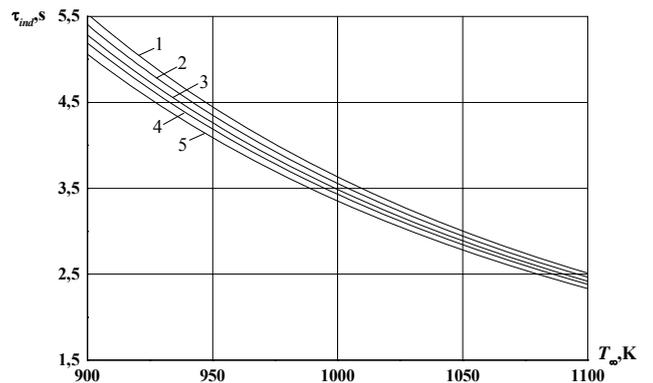


Рис. 1е Зависимость  $\tau_{ind}(T_{\infty})$  для смеси 50%ДТ+50%РМЭ и А:  
(1) – 50%ДТ+50%РМЭ; (2) – 50%ДТ+50%РМЭ+2,5%А; (3) – 50%ДТ+50%РМЭ+5%А; (4) – 50%ДТ+50%РМЭ+7%А; (5) – 50%ДТ+50%РМЭ+10%А.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ОДИНОЧНОЙ КАПЛИ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА

### Экспериментальная установка и методика измерений

Экспериментальные исследования проводились на установке, основным конструктивным элементом которой была подвижная печь, закрытая с одного торца, с нагревательным элементом из нихрома (диаметр печи  $7 \cdot 10^{-2}$  м, длина  $12 \cdot 10^{-2}$  м). Схема установки приведена на рис.2.

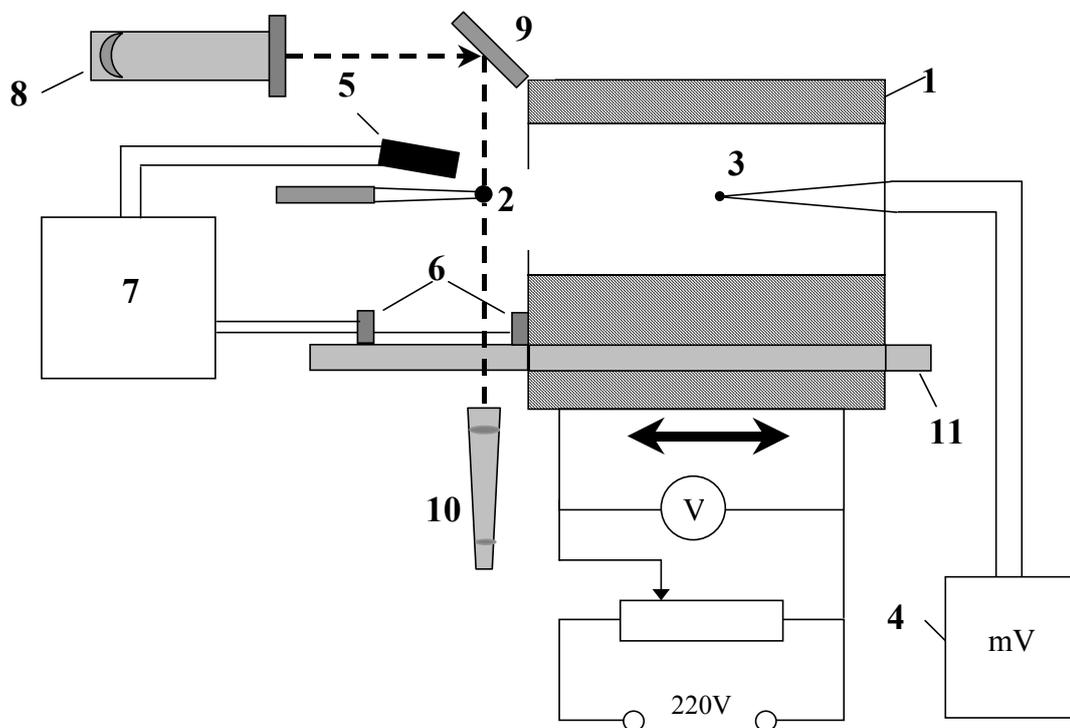


Рис.2 Схема установки: 1 – подвижная печь, 2 – подвес для капли, 3 – датчик измерения температуры среды (термопара ХА), 4 – потенциометр, 5 – фотоэлемент, 6 – синхронизирующие контакты, 7 – таймер, 8 – источник света, 9 – отражающий экран, 10 – зрительная трубка, 11 – направляющие для перемещения печи.

Исследования зависимости времени задержки воспламенения и времени горения одиночных капель различных смесей ДТ, РМЭ и А от температуры окружающей среды проводились по следующей методике. Используя дозирующее устройство, капля исследуемого топлива, помещалась на подвес. С помощью зрительной трубы, в отраженном свете на фоне белого экрана определялся начальный диаметр капли  $d_0$ . Капля на стеклянном подвесе принимала форму несколько вытянутую в вертикальном направлении. Поэтому при измерении размеров капель фиксировался также и ее вертикальный размер.

После определения, по показаниям потенциометра, температуры окружающей среды в печи, капля помещалась внутрь нее. Момент времени, когда капля исследуемого топлива оказывалась в центре печи, на небольшом расстоянии ( $2 \div 3$  мм) от жестко закрепленной термопары, синхронизировался с помощью механического контакта с моментом включения таймера. Время задержки воспламенения капли (индукционный период -  $\tau_{ind}$ ) определялось как время от момента помещения капли в центр печи до момента появления пламени вокруг капли. Таймер фиксировал также и полное время жизни капли. Время горения капли находилось как разность между временем жизни капли и периодом задержки воспламенения. Данные по времени задержки воспламенения, и критическому значению температуры получались из серии по 5 – 10 опытов с каплями заданного диаметра

### Экспериментальные исследования зависимости времени задержки воспламенения дизельного топлива и биотоплив от температуры

При анализе результатов экспериментальных исследований и сравнении их с данными, полученными в рамках квазистационарной модели, следует принимать во внимание, что данная модель фактически является моделью инертного прогрева капли, т.е. такого прогрева, когда в сферическом слое вокруг капли выгорание паров до момента ее воспламенения отсутствует. Очевидно, что это положение делает неприменимой данную модель в области температур, непосредственно примыкающей к пределу воспламенения одиночных капель углеводородных топлив. Поэтому следует ожидать, что выводы, полученные в рамках этой модели в отношении величины времени задержки воспламенения топлив и влияния добавок РМЭ и А к минеральному дизельному топливу ДТ могут найти свое экспериментальное подтверждение только в том случае, когда капля топлива воспламеняется при температурах значительно превышающих критическую температуру воспламенения.

Действительно, как следует из данных эксперимента, представленных в таблице 3 и на рис.3., период задержки воспламенения одиночных капель ДТ незначительно превышает или равен в пределах погрешности измерений аналогичному показателю для капель РМЭ, вплоть до температуры  $T_{\infty} = 945K$ , что не согласуется с результатами расчета  $\tau_{ind}$  по квазистационарной модели. Однако, дальнейший рост температуры, изменяет это соотношение. При температурах  $T_{\infty} = 955K$  и  $965K$ , период задержки воспламенения капли ДТ оказался на 12 - 18% меньше чем для капли РМЭ аналогичного диаметра. Проверить, сохраняется ли подобная тенденция при более высоких температурах, оказалось невозможным, поскольку капли РМЭ скапывали с подвеса раньше, чем происходило их воспламенение. Процесс воспламенения капель ДТ, удалось проследить до более высоких температур, вплоть до  $1005K$ . Это можно объяснить, несколько большей плотностью жидкого РМЭ по сравнению с ДТ, и вероятно, более сильной зависимостью коэффициента поверхностного натяжения РМЭ от температуры.

Таблица 3

Данные эксперимента по определению зависимости периода задержки воспламенения одиночных капель ДТ и РМЭ от температуры окружающей среды, начальный радиус капли  $r_0 = 1,125мм$ .

$T_{\infty}, K$	РМЭ		ДТ	
	$\tau_{ind}, c$	$\Delta\tau_{ind}, c$	$\tau_{ind}, c$	$\Delta\tau_{ind}, c$
860	5,39	$\pm 0,15$	-	-
875	4,98	$\pm 0,20$	-	-
885	4,8	$\pm 0,12$	-	-
895	4,75	$\pm 0,09$	-	-
905	4,38	$\pm 0,05$	-	-
910	4,30	$\pm 0,07$	4,59	$\pm 0,20$
915	4,18	$\pm 0,08$	4,5	$\pm 0,14$
925	4,00	$\pm 0,07$	4,23	$\pm 0,15$
935	3,92	$\pm 0,10$	4,03	$\pm 0,10$
945	3,78	$\pm 0,06$	3,68	$\pm 0,07$
955	3,73	$\pm 0,05$	3,32	$\pm 0,10$
965	3,68	$\pm 0,10$	3,13	$\pm 0,15$
975	-	-	3,02	$\pm 0,05$
985	-	-	2,70	$\pm 0,07$
995	-	-	2,55	$\pm 0,09$
1005	-	-	2,39	$\pm 0,12$

Следует отметить, также, что критическая температура ДТ оказалась более высокой чем у РМЭ –  $910K$  и  $860K$  соответственно. Этот результат, хорошо согласуется с данными других экспериментов по определению периода задержки воспламенения одиночных капель РМЭ и ДТ близкого радиуса  $r_0 = 1мм$ . В качестве подвеса в этих экспериментах использовалась хромель – алюмелиевая термопара.

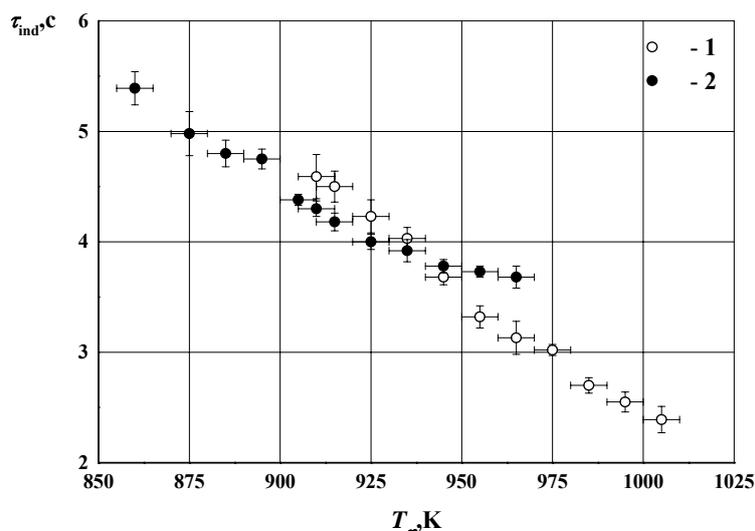


Рис. 3 Зависимость периода задержки воспламенения одиночных капель ДТ – (1) и РМЭ – (2) от температуры окружающей среды, (начальный радиус капли  $r_0 = 1,125\text{мм}$ ).

Таким образом, результаты расчетов периода задержки воспламенения для одиночных капель ДТ и РМЭ по квазистационарной модели находятся в качественном соответствии с данными эксперимента, начиная с температуры  $T_\infty = 955\text{K}$  и выше. Это значение температуры превышает критическую температуру воспламенения РМЭ на 95 градусов.

Еще один важный вывод, который следует из анализа результатов расчетов по квазистационарной модели воспламенения одиночных капель жидких топлив, заключается в том, что добавки дигидрированного спирта А к ДТ и РМЭ уменьшают значение времени задержки воспламенения  $\tau_{ind}$  этих топлив, а добавки РМЭ к ДТ напротив увеличивают  $\tau_{ind}$ . С целью проверки этого положения были проведены эксперименты с несколькими топливными смесями. В качестве объектов исследования были выбраны двух- и трехкомпонентные топливные смеси: 100%ДТ+5А; 100%РМЭ+5%А; 90%ДТ+10%РМЭ; 90%ДТ+10%РМЭ+5%А., (таблица 4).

Таблица 4

Результаты измерений периода задержки воспламенения одиночной капли (ДТ), (РМЭ), и их смесей с (А) при температуре окружающей среды  $T_\infty = 965\text{K}$ , начальный радиус капли  $r_0 = 1,125\text{мм}$

Топливо	Период задержки воспламенения $\tau_{ind}, \text{C}$ (расчет по (1))	Период задержки воспламенения $\tau_{ind}, \text{C}$ (эксперимент)	Абсолютная погрешность измерений $\Delta\tau_{ind}, \text{C}$	Относительная погрешность измерений $\varepsilon, \%$
100%ДТ	4,39	3,13	$\pm 0,15$	4,8
100%РМЭ	7,67	3,68	$\pm 0,10$	2,7
100%ДТ+5А	4,23	2,68	$\pm 0,25$	9,5
100%РМЭ+5%А	6,03	3,29	$\pm 0,15$	4,5
90%ДТ+10%РМЭ	4,57	3,29	$\pm 0,07$	2,1
90%ДТ+10%РМЭ+5%А	4,39	3,06	$\pm 0,09$	2,8

Как показали результаты экспериментов, введение малых добавок к базовым топливам, практически не изменило критические условия воспламенения (рис.4 а-в). Результаты измерений критической температуры воспламенения данных топливных смесей находятся в пределах погрешности эксперимента.

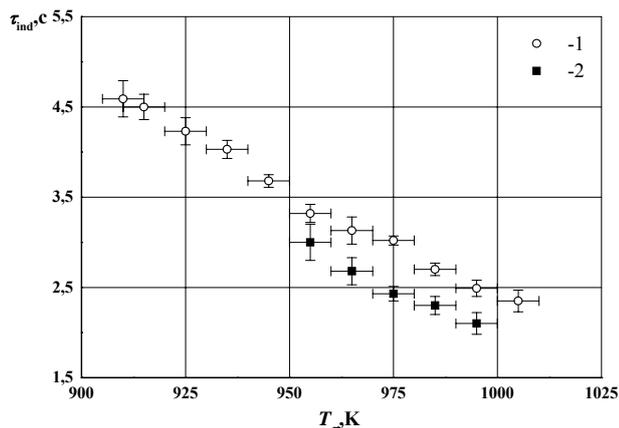


Рис.4а Зависимость периода задержки воспламенения одиночных капель ДТ – (1) и двухкомпонентной смеси 100%ДТ+5А – (2) от температуры окружающей среды

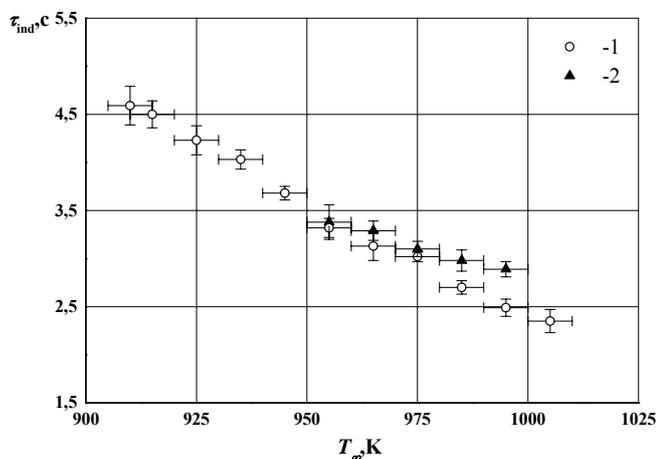


Рис.4б Зависимость периода задержки воспламенения одиночных капель ДТ – (1) и двухкомпонентной смеси 90%ДТ+10%РМЭ– (2) от температуры окружающей среды

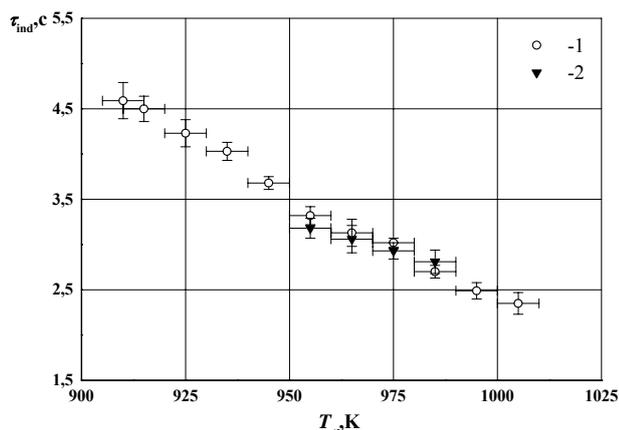


Рис.4в Зависимость периода задержки воспламенения одиночных капель ДТ – (1) и трехкомпонентной смеси 90%ДТ+10%РМЭ+5%А– (2) от температуры окружающей среды

Как видно из представленных в таблице 4 и на рис 4 данных, результаты эксперимента качественно хорошо совпадают с данными расчета по квазистационарной модели. При этом, следует отметить, что влияние малых добавок (А) к (ДТ) на величину периода задержки

воспламенения одиночной капли двухкомпонентного топлива проявляется в большей степени чем, для больших по объему в два раза добавок (РМЭ) к (ДТ) (рис.4а ,б). А совместное использование (А) и (РМЭ) в качестве добавок к ДТ, приближает время задержки воспламенения к значению  $\tau_{ind}$  для чистого ДТ. Сравнение данных расчета по приближенной модели и эксперимента показало, что наиболее близкое по значению времени задержки воспламенения одиночной капли минерального дизельного топлива имеет место для мультикомпонентной смеси 90%ДТ+10%РМЭ+5%А (рис.4в).

### СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ

Испытания проводили с дизельным двигателем Д144 мощностью 37 кВт, смонтированным на стенде КИ 5542. Двигатель воздушного охлаждения оснащен одноплунжерным топливным насосом НД 21/4. Перед проведением опытов, трехструйные форсунки топлива 6Т2 были проверены и отрегулированы на стенде КИ-16301А на начальное давление впрыска  $17,5 \pm 0,5$  МПа. Топливный насос отрегулирован на впрыск топлива при угле опережения  $25 \pm 1^\circ$ . Крутящий момент на валу двигателя определяли с погрешностью  $\pm 5\%$ . Частоту вращения определяли числовым тахометром TESA с погрешностью  $\pm 1\%$ . Контроль за работой двигателя осуществляли измеряя давление масла в системе манометром МОШ 1-160 с погрешностью  $\pm 20$  кПа. Температуру масла измеряли логометром Ш 69000 с терморезистором типа ТСМ. Погрешность измерения  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

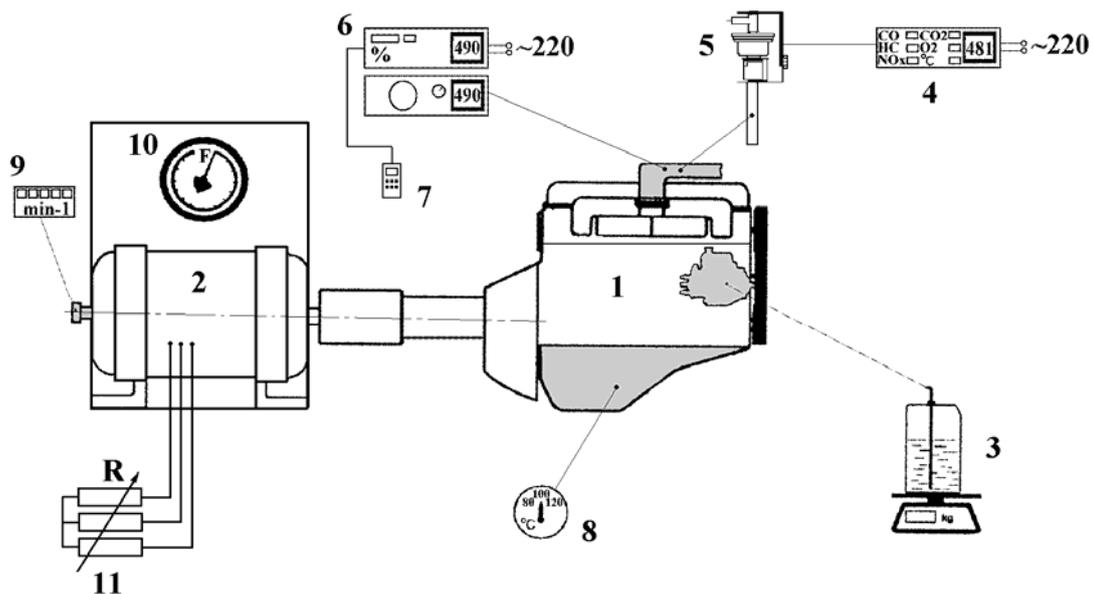


Рис.5 Схема испытательного стенда: 1 – двигатель Д 144; 2 - генератор; 3 – весы РН-10; 4 – газовый анализатор Technotest 481; 5 – зонд газового анализатора; 6 – дымометр Technotest 490; 7 – регистратор показаний дымомера; 8 - терморезистор; 9 – числовой тахометр; 10 – механизм измерения крутящего момента; 11 – жидкостный реостат.

Проведенные, с целью проверки полученных модельных результатов, стендовые испытания на двигателе Д 144 показали, что введение малых добавок биоэтанола к смеси ДТ и РМЭ, уменьшает удельный расход топлива. Наименьший удельный расход топлива для трехкомпонентных смесей достигался при добавках биоэтанола от 2,5 до 5% на различных режимах работы двигателя рис.6. Уменьшение расхода составляло от 3,6 до 6% по сравнению с базовыми смесями ДТ и РМЭ, и было максимальным при работе двигателя с малой нагрузкой.

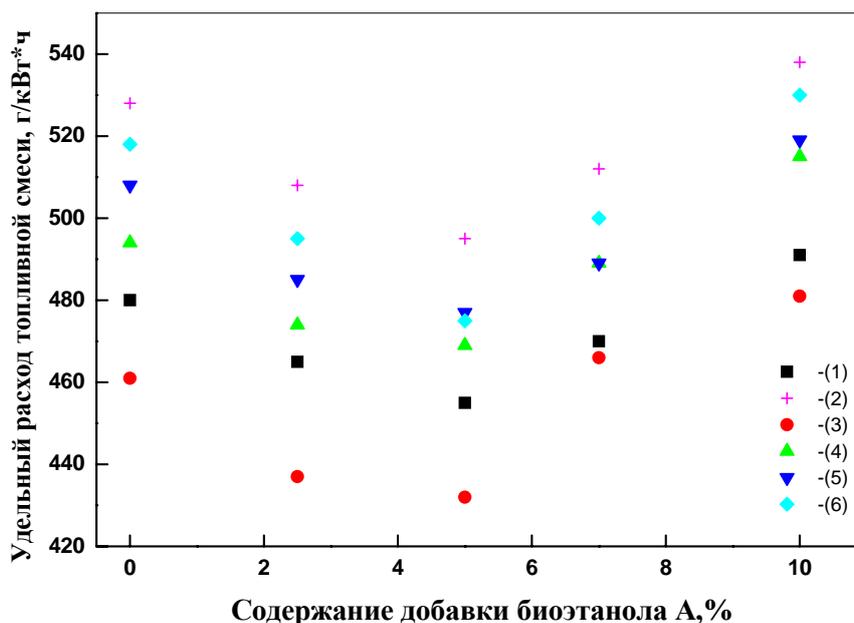


Рис.6 Зависимость удельного расхода топлива от концентрации компонентов топливных смесей при эффективной мощности двигателя 6кВт (1)–минеральное дизельное топливо (ДТ); (2)–рапсово-метиловый эфир (РМЭ); (3)–топливная смесь 95%ДТ+5%РМЭ; (4)–топливная смесь 70%ДТ+30%РМЭ; (5)–топливная смесь 50%ДТ+50%РМЭ; (6)–топливная смесь 20%ДТ+80%РМЭ.

## ВЫВОДЫ

1. В рамках квазистационарной модели инертного прогрева одиночной капли углеводородного топлива получено выражение для времени задержки воспламенения капли, из которого видно, что изменяя теплофизические свойства жидкой фазы и паров топлива можно влиять на величину периода задержки воспламенения.
2. Анализ результатов расчетов показал, что введение малых добавок рапсово-метилового эфира к дизельному топливу должно увеличить, а этанола, напротив уменьшить время задержки воспламенения. При этом результаты расчетов должны быть справедливы для области температур, значительно превышающих критическую температуру воспламенения капли топлива.
3. Результаты расчетов по квазистационарной модели воспламенения одиночной капли углеводородного топлива хорошо согласуются с данными эксперимента начиная с температуры 955K и выше. Это значение температуры превышает критическую температуру воспламенения РМЭ на 95 градусов. Наиболее близкое по значению времени задержки воспламенения одиночной капли минерального дизельного топлива имеет место для мультикомпонентной смеси 90%ДТ+10%РМЭ+5%А.
4. Введение малых добавок биоэтанола к смеси ДТ и РМЭ, уменьшает удельный расход топлива. Наименьший расход топлива для всех изученных смесей при различных режимах работы двигателя имел место при добавках от 2,5 до 5% биоэтанола. Самой оптимальной по этому параметру оказалась топливная смесь 95%ДТ+5%РМЭ+5%А, уменьшение расхода для которой составило 6,3%. Наиболее неэкономично двигатель работал при максимальной частоте вращения коленчатого вала и минимальной нагрузке.

## Литература:

- [1] А.К.Копейка, В.В.Головко, В.И.Бровченко, Е.Г.Олешко, Д.С.Дараков Воспламенение и горение одиночной капли рапсово - метилового эфира и его топливных смесей с дизельным топливом, V Минский международный форум по тепломассообмену. Минск, 24-28 мая 2004, Т.4, -Р.4-14.
- [2] Варшавский Г.А., Федосеев Д.В., Франк-Каменецкий А.Д.: Квазистационарная теория воспламенения капли жидкого топлива // Физика аэродисперсных систем 1969. №1. С. 101-107.
- [3] Копейка А.К., Головко В.В., Бровченко В.И., Дараков Д.С. Воспламенение одиночной капли рапсово - метилового эфира. Физика аэродисперсных систем, 2002, №39, с.103-108
- [4] Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей М.:, 1972, с.-720
- [5] Химическая энциклопедия Т.2, М.:Сов.энцикл., 1990
- [6] М.Г.Рудин Карманный справочник нефтепереработчика Л.: Химия, 1989, с.-464
- [7] Шеломенцев А.М. Расчет теплофизических свойств нефтепродуктов М.: Изд. Стандартов, 1985, 76с.
- [8] С.Бретшнайдер Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчета. М.:Л.: Химия, 1966, с.-536
- [9] Thomas L.H. J.Chem.Soc., 1946, 573 цит по [8]
- [10] Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей, М.: Гостоптехиздат, 1964 цит по [8]
- [11] [http:// www.encyclopedia.com](http://www.encyclopedia.com)
- [12] Фальковский В.Б. //Ж-л Физической Химии, 1948, Т.18, с.1639, цит.по [8]
- [13] Flynn L.W., Thodos G. J.Chem.Eng.Data, 1961. Vol.6, p.457, цит по [8]
- [14] Рабинович Г.Г., Рябых П.М., Хохряков П.А. Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки. Справочник. М.: Химия, 1979, С.567 цит по [7]
- [15] Cragoe C.S. Thermal properties of petroleum products. Washington: Gov.print.off., 1929, p.48, цит по [7]
- [16] Misic D., Thodos G. Am.Inst.Chem.Eng., 1961. Vol.7, p.264, цит по [8]
- [17] Hilsenrath J., Touloukian I.S. Trans. ASME, 1954. Vol.76, p.967, цит по [8]
- [18] W.B.Kay, Ind.Eng.Chem., V.28, p.1014, 1936, цит.по [8]