

УДК 536.62;662.758

**Воробьев Л.И., Грабов Л.Н., Декуша Л.В., Назаренко О.А., Шматок А.И.**

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТВОРНОЙ СПОСОБНОСТИ БИОТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ

Проведено експериментальне визначення теплотворної здатності рідких біопалив, а також сумішей біодизелю з традиційним дизельним паливом. Проведено порівняльний аналіз теплоти згорання дизельного палива й біодизельних палив, отриманих з використанням метилового й етилового спиртів.

Проведено експериментальное определение теплотворной способности жидких биотоплив, а также смесей биодизеля с традиционным дизельным топливом. Произведен сравнительный анализ теплоты сгорания дизельного топлива и биодизельных топлив, полученных с использованием метилового и этилового спиртов.

Experimental definition of calorific efficiency of liquid biofuels, and mixes of biodiesel with traditional diesel fuel is spent. The comparative analysis of combustion value of diesel and biodiesel fuels made with use methyl and ethyl spirits is made.

ДВС – двигатель внутреннего сгорания;  
ДТ – дизельное топливо;  
ИТТФ НАНУ – Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины;  
МЭРМ – метиловый эфир рапсового масла;  
ПК – персональный компьютер;

ПТП – преобразователь теплового потока;  
РМ – рапсовое масло;  
СЭ – спирт этиловый;  
ТБ – тепловой блок;  
ТС – термометр сопротивления;  
ЭБ – электронный блок;  
ЭЭРМ – этиловый эфир рапсового масла.

Одной из основных характеристик моторных топлив является их теплотворная способность, которая характеризует способность топлива к выделению теплоты при сгорании.

Теплотворная способность традиционных моторных топлив, производимых из нефти, достаточно хорошо изучена. В то же время теплотворные способности топлив, получаемых из биомассы, таких как биоэтанол и биодизель, а также их смесей с традиционными топливами, не изучены в достаточной степени.

В связи с этим, в ИТТФ НАНУ исследовали теплоту сгорания образцов биодизеля, произведенного с использованием метилового и этилового спиртов [1], биоэтанола и биотопливных смесей. Образцы биодизеля, а также смеси биодизеля с традиционным ДТ, были получены на экспериментальном стенде в ИТТФ НАНУ [2]. Кроме того, была исследована теплотворная способность смесей рапсового масла с биоэтанолом, которые могут быть использованы в качестве топлив для ДВС [3, 4]. Определение теплоты сгорания биотоплив и их смесей с традиционными моторными топливами позволяет произвести энер-

гетическую оценку использования биотоплив в двигателях внутреннего сгорания.

Обозначение образцов топлив и их состав представлены в табл. 1.

Теплотворную способность образцов исследовали с помощью калориметра модели КТС-4, разработанного в отделе теплометрии ИТТФ НАНУ. Прибор КТС-4 является бомбовым анероидным изопериболическим калориметром теплового потока. По сравнению с ранее разработанными моделями калориметров КТС [5, 6] в конструкцию прибора КТС-4 внесен ряд усовершенствований, направленных на повышение технологичности изготовления, уменьшение длительности подготовки и повышение точности измерений. Диапазон измерения калориметра – от 10 до 40 кДж, погрешность измерения  $\pm 0,1\%$ , длительность процесса подготовки – не более 90 минут, процесса измерения – 30 минут.

Внешний вид калориметра КТС-4 представлен на рис. 1.

В состав калориметра входят:

– тепловой блок, предназначенный для размещения в нём бомбы с пробой топлива, обе-

Табл. 1. Состав исследуемых топлив

№ п/п	Обозначение топлива	Состав топлив
1	СЭ	Спирт этиловый абсолютный (биоэтанол)
2	РМ	Рапсовое масло
3	МЭРМ	Метиловые эфиры рапсового масла (биодизель)
4	ЭЭРМ	Этиловые эфиры рапсового масла (биодизель)
5	БП-10	Смесь 90% рапсового масла и 10% спирта этилового
6	БП-30	Смесь 70% рапсового масла и 30% спирта этилового
7	БП-40	Смесь 60% рапсового масла и 40% спирта этилового
8	БП-50	Смесь 50% рапсового масла и 50% спирта этилового
9	БП-60	Смесь 40% рапсового масла и 60% спирта этилового
10	БП-80	Смесь 20% рапсового масла и 80% спирта этилового
11	ДТ	Дизельное топливо
12	Б2э	Смесь ДТ 98% и ЭЭРМ 2%
13	Б5э	Смесь ДТ 95% и ЭЭРМ 5%
14	Б20э	Смесь ДТ 80% и ЭЭРМ 20%
15	Б2м	Смесь ДТ 98% и МЭРМ 2%
16	Б5м	Смесь ДТ 95% и МЭРМ 5%
17	Б20м	Смесь ДТ 80% и МЭРМ 20%



*Рис. 1. Внешний вид калориметра КТС-4.*

спечения необходимого температурного режима работы и измерения тепловыделения из бомбы при сжигании пробы топлива;

- две калориметрические бомбы БКУ-2, предназначенные для сжигания пробы топлива в атмосфере кислорода;

- электронный блок, предназначенный для регулирования теплового режима, измерения и обработки сигналов первичных преобразователей, формирования электрического импульса поджога пробы топлива, передачи измерительной информации в персональный компьютер;

- сервисное оборудование.

Принцип работы калориметра основан на измерении теплового потока, образующегося при сжигании пробы топлива и интегрирования его, вследствие чего определяют теплоту, выделившуюся при сгорании пробы.

В настоящее время в Украине отсутствуют стандарты, определяющие порядок измерения теплоты сгорания биотоплив. Поэтому подготовку проб топлив и вычисление результатов проводили в соответствии со стандартом [7] для нефтепродуктов, а порядок работы с калориметром КТС-4 соответствовал требованиям его технической документации.

Поскольку исследуемые вещества имели компоненты, которые легко испаряются и возгораются при контакте с кислородом, образцы топлив сжигались в упаковке из полиэтилена. Вещества на основе дизельного топлива при сгорании кипят и выплескиваются из тигля, вследствие чего сгорают не полностью. Для предотвращения кипения к таким образцам прибавляли хлопчатобумажный наполнитель (вату). Теплота сгорания полиэтилена и наполнителя были определены предварительно с помощью этого же калориметра и учтены при обработке результатов исследований.

При подготовке пробы измеряли массу пробы топлива  $M_{\text{топл}}$ , полиэтиленовой упаковки  $M_{\text{уп}}$ , медного провода поджога  $M_{\text{пр1}}$  и наполнителя  $M_{\text{нап}}$ . При проведении калориметрического опыта в приборе КТС-4 определяли теплоту  $Q_{\text{и}}$  (Дж), которая выделилась при сжигании пробы, а после опыта измеряли массу

остатка провода поджога  $M_{\text{пр2}}$ . Если в бомбе были остатки пробы топлива, которые не сгорели, опыт считался недействительным.

Удельная теплота сгорания топлива в бомбе рассчитывается по формуле:

$$q_{\text{бомб}} = [Q_{\text{и}} - q_{\text{пр}} (M_{\text{пр1}} - M_{\text{пр2}}) - q_{\text{уп}} \cdot M_{\text{уп}} - q_{\text{нап}} \cdot M_{\text{нап}}] / M_{\text{топл}}, \quad (1)$$

где  $q_{\text{бомб}}$  – удельная теплота сгорания топлива в бомбе калориметра;  $Q_{\text{и}}$  – измеренная теплота сгорания пробы топлива;  $q_{\text{пр}} = 2510$  Дж/г – удельная теплота сгорания провода поджога;  $M_{\text{пр1}}$  – масса провода поджога;  $M_{\text{пр2}}$  – масса остатка провода поджога;  $q_{\text{уп}} = 46382$  Дж/г – удельная теплота сгорания упаковки из полиэтилена;  $M_{\text{уп}}$  – масса полиэтиленовой упаковки;  $q_{\text{нап}} = 16700$  Дж/г – удельная теплота сгорания хлопчатобумажного наполнителя;  $M_{\text{нап}}$  – масса хлопчатобумажного наполнителя;  $M_{\text{топл}}$  – масса пробы топлива.

Измерение теплоты сгорания каждого вещества проводили, как минимум, два раза. В соответствии со стандартом [7], если результаты измерений теплоты сгорания в бомбе отличаются между собой не больше чем на 130 Дж/г, рассчитывается среднее значение, которое и считается результатом определения теплоты сгорания в бомбе. Если результаты различаются больше чем на 130 Дж/г, проводится третий опыт и результатом определения считается среднее значениями между двумя ближайшими.

Высшую теплоту сгорания топлива рассчитывали по формуле:

$$q_{\text{в}} = q_{\text{бомб}} - \left( 94 \cdot S + \frac{q_3 \cdot \bar{V}}{M_{\text{топл}}} \right), \quad (2)$$

где  $q_{\text{в}}$  – высшая теплота сгорания топлива;  $q_{\text{бомб}}$  – удельная теплота сгорания топлива в бомбе калориметра;  $S$  – массовая доля серы в топливе, %;  $q_3$  – теплота образования 1 см<sup>3</sup> 0,1 моль/дм<sup>3</sup> раствора азотной кислоты, которая равняется 6 Дж/см<sup>3</sup>;  $\bar{V}$  – средний объем

0,1 моль/дм<sup>3</sup> раствора щелочи, которая израсходована на титрование смыва при градуировании калориметра ( $\bar{V} = 5 \text{ см}^3$ );  $M_{\text{топл}}$  – масса пробы топлива.

Низшую теплоту сгорания рассчитывали по формуле :

$$q_n = q_b - 24,42 \cdot (8,94 \cdot H + W), \quad (3)$$

где  $q_n$  – низшая теплота сгорания топлива;  $q_b$  – высшая теплота сгорания топлива; 24,42 – теплота парообразования при 25 °С из расчета на 1 % воды, которая образовалась, кДж/кг; 8,94 – коэффициент перерасчета массовой доли водорода на воду;  $H$  – массовая доля водорода в топливе;  $W$  – массовая доля воды в топливе.

Результаты расчетов низшей теплоты сгорания округлены к ближайшему значению, кратному 10 кДж/кг.

Следует отметить, что при сжигании в бомбе смесей рапсового масла с этиловым спиртом (образцы топлив № 5...№ 10 табл. 1), в тигле образовывалось незначительное количество шлаков (приблизительно 1...1,5 % от начальной массы пробы), что может быть связано с недостаточной очисткой исходных компонентов.

Для расчета высшей теплоты сгорания необходима информация о содержании серы в топливе, а для расчета низшей теплоты

сгорания – о содержании водорода и воды. По данным литературных источников содержание серы в дизельном топливе не превышает 0,2 % [8], а в биодизеле (МЭРМ и ЭЭРМ) и масле – 0,02 % [9].

Содержание водорода в этиловом спирте, масле рапсовом, метиловых и этиловых эфирах рассчитано основываясь на известном химическом составе. Массовая доля (%) водорода в дизельном топливе рассчитана по высшей теплоте сгорания по эмпирическим формулам, приведенными в стандарте [7]:

$$H = (0,001195 \cdot q_b - 41,4) - \text{для дизельного топлива.}$$

По данным производителя этилового спирта массовая доля воды в нем составляет 0,3 %. Содержание влаги в дизельном топливе и эфирах (МЭРМ и ЭЭРМ) принято равным 0 %. Содержание влаги в рапсовом масле определено экспериментально по методике [10]. По результатам измерений содержание влаги в рапсовом масле – 0 %.

Результаты расчетов количества серы, водорода и влаги в исследуемых топливах представлены в табл. 2.

Расчеты высшей и низшей теплоты сгорания топлив проведены согласно формулам (2) и (3), их результаты приведены в табл. 3.

Табл. 2. Расчет количества серы, водорода и влаги в образцах топлив

№ п/п	Обозначение топлива	Количество серы S, %	Количество водорода H, %	Количество влаги W, %
1	СЭ	0	13,13	0,30
2	РМ	0,02	11,43	0,00
3	МЭРМ	0,02	11,83	0,00
4	ЭЭРМ	0,02	11,94	0,00
5	БП-10	0,018	11,60	0,03
6	БП-30	0,014	11,94	0,09
7	БП-40	0,012	12,11	0,12
8	БП-50	0,01	12,28	0,15
9	БП-60	0,008	12,45	0,18
10	БП-80	0,004	12,79	0,24
11	ДТ	0,2	13,37	0,00

12	Б2э	0,1964	13,34	0,00
13	Б5э	0,191	13,30	0,00
14	Б20э	0,164	13,09	0,00
15	Б2м	0,1964	13,34	0,00
16	Б5м	0,191	13,29	0,00
17	Б20м	0,164	13,06	0,00

Табл. 3. Расчет высшей и низшей теплоты сгорания топлив по результатам исследований

№ з/п	Обозначение топлива	$q_{\text{бонб}}$ кДж/кг	Высшая теплота сгорания, кДж/кг	Низшая теплота сгорания, кДж/кг	Низшая теплота сгорания (округленная), кДж/кг
1	СЭ	29036	28948	26074	26070
2	РМ	36544	39460	36966	36970
3	МЭРМ	39850	39753	37171	37170
4	ЭЭРМ	39982	39892	37285	37290
5	БП-10	37977	37887	35355	35360
6	БП-30	35793	35703	33095	33100
7	БП-40	34902	34813	32167	32170
8	БП-50	33752	33663	30979	30980
9	БП-60	32708	32618	29896	29900
10	БП-80	30553	30464	27667	27670
11	ДТ	45941	45834	42915	42920
12	Б2э	45776	45669	42756	42760
13	Б5э	45613	45507	42603	42600
14	Б20э	44999	44895	42039	42040
15	Б2м	45724	45617	42705	42700
16	Б5м	45489	45383	42480	42480
17	Б20м	44768	44664	41813	41810

По результатам проведенных исследований определено, что теплота сгорания биодизельного топлива, получаемого с использованием этилового спирта (ЭЭРМ) несколько выше биодизеля, полученного с использованием метилового спирта (МЭРМ), который традиционно используется в производстве биодизеля. Также необходимо отметить, что измеренная теплота сгорания образцов биодизельных топлив, полученных с использованием метилового и

этилового спиртов, меньше на 13,4 и 13,3 %, соответственно, в сравнении с теплотворной способностью традиционного ДТ.

Для вычисления увеличения объемного расхода биодизеля по сравнению с ДТ были измерены плотности образцов соответствующих топлив и произведен перерасчет объемной теплоты сгорания топлив (табл. 4).

Как видно из таблицы, разница объемной теплоты сгорания образцов чистого биодизеля,

Табл. 4. Расчет объемной теплоты сгорания образцов топлив

№ з/п	Обозначение топлива	Низшая теплота сгорания (округленная), кДж/кг	Плотность образцов топлив, кг/л	Низшая теплота сгорания (объемная), кДж/л
1	МЭРМ	37170	0,8703	32350
1	ЭЭРМ	37290	0,8708	32470
3	ДТ	42920	0,8296	35610
4	Б2э	42760	0,8304	35510
5	Б5э	42600	0,8317	35430
6	Б20э	42040	0,8378	35220
7	Б2м	42700	0,8304	35460
8	Б5м	42480	0,8316	35330
9	Б20м	41810	0,8377	35020

полученного с использованием метилового и этилового спиртов, и объемной теплоты сгорания ДТ, составляет 9,2 и 8,8 %, соответственно. Это обстоятельство позволяет сделать вывод об соответствующем увеличении расхода топлива в ДВС при его работе на биодизельном топливе, что необходимо учитывать при экономической и энергетической оценке производства и использования биодизеля.

### Выводы

По результатам проведенных исследований определены высшая и низшая теплоты сгорания жидких биотоплив, нефтепродуктов и биотопливных смесей. Определено, что для смесей традиционного дизельного топлива и метиловых или этиловых эфиров рапсового масла (биодизеля) действует закон аддитивности, т.е. теплота сгорания смесей отвечает теплоте сгорания компонентов в пропорциональном соотношении. Для смесей рапсового масла и биоэтанола (образцы № 5...№ 10 табл. 1) отмечено, что измеренная теплота сгорания смеси на 1,5...2 % ниже расчетной теплоты сгорания компонентов смеси, взятых в соответствующем пропорциональном соотношении. Кроме того, при сжигании образцов смесей рапсового масла и биоэтанола отмечено образование некоторого количества шлаков (1...1,5 % от начальной массы пробы).

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Грабов Л.М., Шматок О.И.* Производство альтернативного биодизельного топлива и перспективы его развития // Пром. теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 1. – С. 60–65.
2. *Долінський А.А., Грабов Л.М., Мерцій В.І., Шматок О.І.* Теплофизические параметры и экспериментальное оборудование для получения жидких биотоплив из растительных масел и спиртов // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т. 32, № 3. – С. 50-58.
2. *Грабов Л.М., Шматок А.И.* Инновационный способ и оборудование для получения биодизельного топлива из растительных масел и спиртов // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 7. – С. 36-40.
4. *Патент України №47397.* Спосіб приготування рідкого біопалива / Грабов та ін. – 2010, Бюл. № 2, С10L1/06, С10L1/08.
5. *Воробьев Л.И., Грищенко Т.Г., Декуша Л.В.* Бомбовые калориметры для определения теплоты сгорания топлива // Инженерно-физический журнал. – 1997. – Т. 70, № 5. – С. 828–839.
6. *Воробьев Л.И., Грищенко Т.Г., Декуша Л.В.* Исследование влияния параметров конструкции кондуктивного бомбового калориметра на погрешности измерения / Пром. теплотехника. – 2001, Т. 23. № 6. – С. 141–146.
7. *ГОСТ 21261-91 Нефтепродукты.* Метод определения высшей теплоты сгорания и

вычисления низшей теплоты сгорания.– М.: Из-во стандартов, 1992. – 23 с.

8. ГОСТ 305-82 Топливо дизельное. Технические условия.

9. EN 14214:2003 “Automotive fuels. Fatty

acid methyl esters (FAME) for diesel engines. Requirements and test methods”.

10. ГОСТ 11812-66 Масла растительные. Методы определения влаги и летучих веществ.

Получено 11.03.2011 г.

УДК 621.928.9

Приемов С.И.

Институт пищевой биотехнологии и геномики НАН Украины

### МЕТОД РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛАВЛИВАНИЯ ПЫЛИ ЦИКЛОНАМИ

Запропоновано метод розрахунку ефективності вловлювання аерозолів в циклонних апаратах. Метод заснований на використанні характеристик турбулентних потоків та закономірностей переносу аерозолів в дифузійному приграничному шарі.

Предложен метод расчета эффективности улавливания аэрозолей в циклонных аппаратах. Метод основан на использовании характеристик турбулентных течений и закономерностей переноса аэрозолей в диффузионном пограничном слое.

A method of calculation of the efficiency of dust recovery in cyclones is proposed. Method is based on using the turbulence flow and laws of carrier of aerosols in diffusion frontier layer.

$D_{ц}$  – диаметр циклона;

$d_{эқв}$  – эквивалентный диаметр входного патрубка циклона;

$d_{50}$  – медианный диаметр пыли;

$d_{η50}$  – диаметр частиц пыли, улавливаемых в циклоне с эффективностью 50 %;

$t_{г}$  – характерное время мелкомасштабных турбулентных пульсаций газа;

$u$  – скорость газа;

$u_{ж}$  – динамическая скорость газа;

$u_{дпс}$  – конечная скорость частицы пыли (в конце ее продвижения через диффузионный пограничный слой перед соприкосновением с препятствием стенкой циклона);

$\varepsilon$  – скорость диссипации турбулентной энергии газа ;

$\zeta$  – коэффициент гидравлического сопротивления;

$\eta$  – эффективность очистки;

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;

$\rho$  – плотность;

$\sigma$  – стандартное отклонение распределения частиц пыли по размерам;

$\sigma_{\eta}$  – стандартное отклонение распределения фракционных степеней очистки;

$\tau$  – время релаксации частиц пыли;

$\omega$  – нижний предел частоты турбулентных пульсаций наиболее энергоемких вихрей;

$a$  – ширина входного патрубка циклона, отнесенная к его диаметру;

$b$  – высота входного патрубка циклона, отнесенная к его диаметру;

$D_{пр}$  – размер препятствия (капля, стенка циклона);

$D_e$  – диаметр выхлопного патрубка циклона (долях от диаметра циклона);

$E$  – коэффициент захвата частицы препятствием.