

Колодницкая Р.В., к.т.н.¹, Вершина Г.А., к.т.н.², Пилатов А.Ю.²

1 – Житомирский государственный технологический университет,
г. Житомир;

2 – Белорусский национальный технический университет, г. Минск

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО СОСТАВА БИОДИЗЕЛЯ ИЗ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

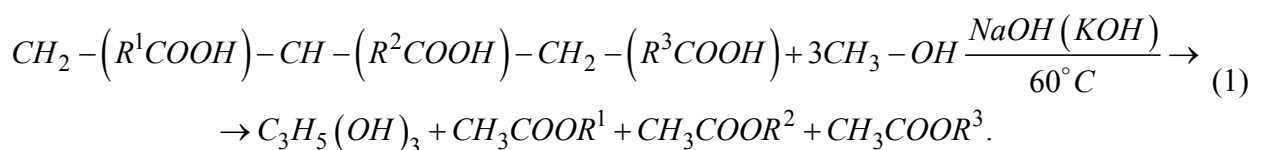
Проведено моделирование индикаторных технико-экономических (удельный индикаторный расход эмиссия NOx) показателей рабочего процесса дизеля, по результатам которого сделан выбор массовой доли углеводов в биодизельном топливе на основе растительных масел по расчетной оценке индикаторных показателей рабочего процесса для наиболее нагруженного режима максимального крутящего момента, соответствующего 13-ти ступенчатому ездовому циклу.

Введение

Одним из наиболее очевидных решений преодоления стоящих перед отраслью двигателестроения задач является частичное либо полное замещение топлива природного углеводородного сырья на синтезированное из растительных масел [1] (рапсовое, конопляное, кокосовое, льняное), среди которых наибольшее применение получило рапсовое масло в виду уже отработанных технологий [2] его выращивания и переработки.

Вопросам использования топлив растительного происхождения в двигателях внутреннего сгорания посвящены многочисленные работы. Например, исследования [2, 3, 4] дают наиболее полное представление об основных физических (плотность, вязкость, поверхностное натяжение) [5] и химических свойствах [3] (химический состав, цетановое число, теплотворная способность) этих топлив во взаимосвязи с особенностями их непосредственного использования на двигателе. Анализ приведенных данных дает возможность судить об основных преимуществах и недостатках по отношению к физико-химическим свойствам дизельного топлива. Повышенное содержание кислорода способствует снижению токсичности в общем случае. В то время как низшая теплота сгорания, а также большая вязкость и плотность ухудшают процесс смесеобразования и воспламенения, что препятствует достижению уровня технико-экономических показателей дизелей. Как показывают экспериментальные исследования работы двигателя на растительных топливах, в частности смесях рапсового масла, это приводит к ухудшению технико-экономических показателей рабочего процесса [6] и необходимости [7] увеличения цикловой подачи вследствие большей плотности растительного топлива и низшей теплотой сгорания.

Одним из основных недостатков растительных масел в связи с использованием их в качестве топлива является их высокая вязкость. Вязкость растительного масла можно снизить его подогреванием. Еще один способ снижения вязкости – это получение метилового или этилового эфира растительного масла или биодизеля. Для этого к растительному маслу добавляется, например, метиловый спирт, после чего смесь подогревается до температуры 50-70°С в присутствии катализатора (NaOH или KOH).



В ходе данной реакции трансэтерификации более тяжелый глицерин $C_3H_5(OH)_3$, присутствие которого в растительном масле обуславливает повышение его вязкости относительно дизельного топлива, отделяется, а полученная смесь эфиров CH_3COOR^1 ; CH_3COOR^2 ; CH_3COOR^3 имеет вязкость, сравнимую с дизельным топливом. При этом наиболее широкое распространение получил биодизель на основе рапсового и соевого масла, который уже продается на заправках и может использоваться в качестве топлива в дизельных двигателях.

Исходя из существующих физико-химических особенностей альтернативных топлив на основе растительных масел, следует отметить наличие определенных изменений в протекании рабочего процесса (процесса сгорания) относительно рабочего процесса на дизельном топливе и ухудшения его показателей в виду изменения его регулировок и меньших значений низшей теплоты сгорания. Поэтому актуальной задачей на сегодня является моделирование показателей рабочего процесса, использующего в качестве топлива растительные масла и их компоненты, с целью корректировки его динамики активного тепловыделения, которая определяет в результате индикаторные показатели.

Проведенными исследованиями [1, 3] установлено, что каждый вид растительного масла и, соответственно, получаемого из него биодизеля, характеризуется отличным от других биотоплив набором физико-химических свойств (плотность, вязкость, поверхностное натяжение, энергия активации и т.д.). Эти свойства определяются особенностями химического состава жирных кислот, свойства которых, в свою очередь, определяются комбинациями чисел атомов углерода C_{16} ; C_{18} ; C_{20} ; C_{22} и водорода H_{30} ; H_{32} ; H_{34} ; H_{38} в межмолекулярных связях и оцениваются в общем случае по массовой доле углерода C , водорода H и кислорода O в топливе.

Основываясь на данных [5, 6, 7, 8, 9, 10], известно более 30 различных видов растительных топлив, пригодных для рабочего процесса дизельного двигателя, характер процесса сгорания которых в дизеле можно в общем случае оценить суммарной массовой долей углеводородов (рис. 1).

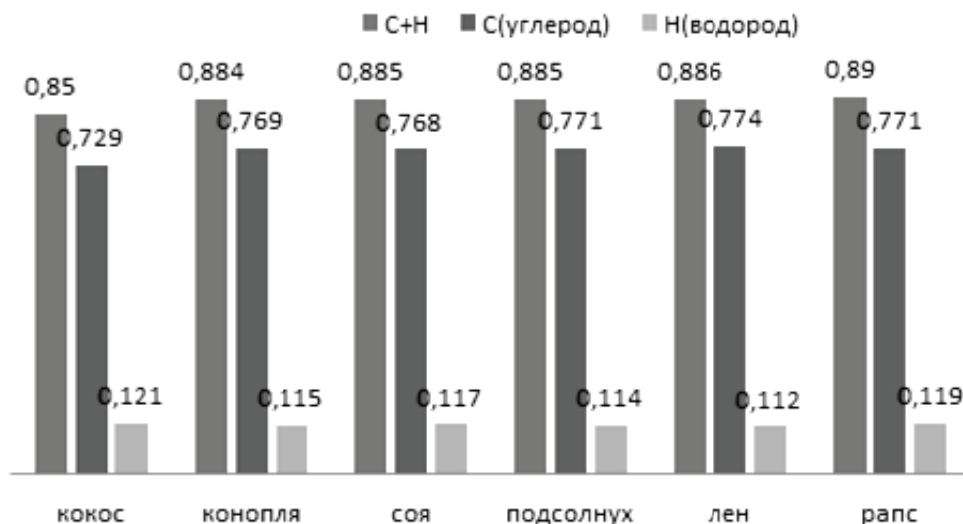


Рис. 1. Состав растительных масел (кислородная доля на рисунке не показана)

Влияние массовых долей углерода и водорода в топливе на протекание рабочего процесса сгорания определяется в существующих методиках [5, 6, 7, 8, 9] расчета динамики активного тепловыделения и показателей рабочего процесса не только через физические (рис. 2 а), но и химические свойства (рис. 2 б) посредством изменений в стехиометрическом отношении, а также энергии активации. Также в исследованиях [1, 3] приводятся результаты по выявлению ряда новых свойств некоторых биотоплив (большее цетановое число и меньшая вязкость) растительного происхождения, что делает необходимым исследование влияния этих особенностей на ход рабочего процесса сгорания в дизеле. Поэтому, несмотря на полученные ранее экспериментальные данные [1, 3] по исследованию физико-химических свойств растительных масел и биодизе-

ля на их основе в качестве топлива, возникает необходимость в непосредственной оценке его индикаторных показателей, что позволит установить оптимальную массовую долю углеводов в топливе с точки зрения расчетных технико-экономических и экологических показателей, а также прогнозировать показатели работы дизеля по физико-химическим свойствам альтернативных топлив на основе растительных масел, в том числе и биодизеля.

Целью данной работы является моделирование индикаторных технико-экономических (удельный индикаторный расход, эмиссия NOx) показателей рабочего процесса дизеля и выбор массовой доли углеводов в биодизельном топливе на основе растительных масел по расчетной оценке индикаторных показателей рабочего процесса для наиболее нагруженного режима максимального крутящего момента, соответствующего 13-ти ступенчатому ездовому циклу.

Объект исследования – перспективный высокофорсированный дизельный двигатель 4ЧН 11×12,5 (Евро4) с возможностью рециркуляции ОГ, производства ОАО «Минский моторный завод», Республика Беларусь.

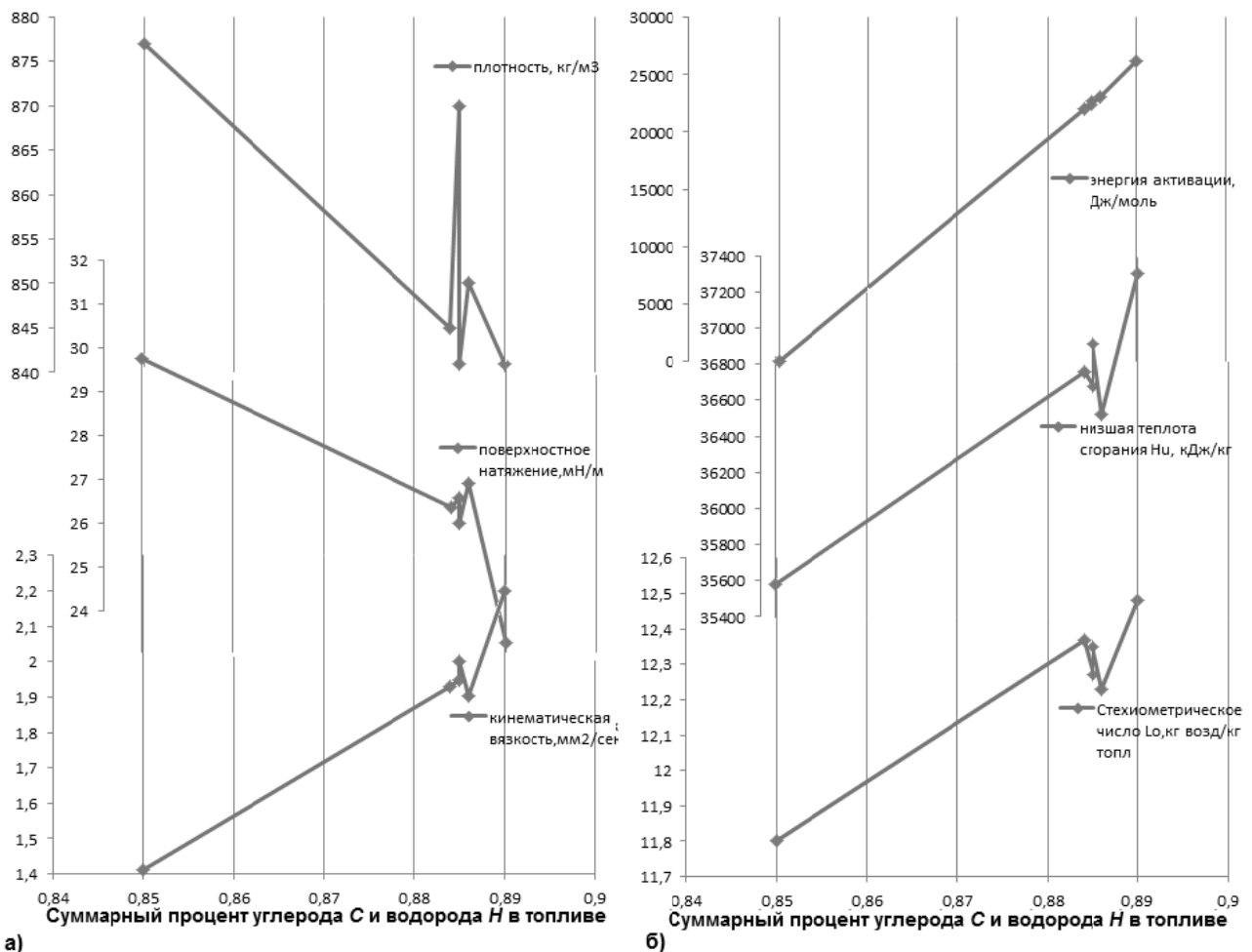


Рис. 2. Сопоставление физико-химических свойств биодизеля на основе растительных масел:
 а) влияние массовой доли углеводорода на физические свойства биодизеля;
 б) влияние массовой доли углеводорода на химические свойства биодизеля

Основной раздел

Моделирование индикаторных показателей рабочего процесса (индикаторная мощность, удельный индикаторный расход топлива, эмиссия NOx) производилось для биодизеля на основе шести типов растительных масел (табл. 1). В работе принималось, что энергия активации растительного масла и биодизельного топлива на его основе равны между собой.

Таблица 1

Состав растительных масел, используемых в качестве топлива дизеля 4ЧН 11×12,5

Жирные кислоты	Число атомов в кислоте			% состав					
	С	Н	О	I	II	III	IV	V	VI
Название	С	Н	О	I	II	III	IV	V	VI
Капровая	6	12	2	0	0,5	0	0	0	0
Каприновая	10	20	2	0	4,5	0	0	0	0
Каприловая	8	16	2	0	4,5	0	0	0	0
Лауриновая	12	24	2	0	5,5	0	0	0	0
Миристиновая	14	28	2	0,1	18	0	0,2	0	0
Пальмитиновая	16	32	2	3,5	5	0	6,4	5,99	10
Стеариновая	18	36	2	1,6	3,2	0	7,3	7	3
Олеиновая	18	34	2	39	6	20	25	32,1	12
Вакценовая	18	34	2	0	0	0	0	2	0
Линолевая	18	32	2	1	2	20	54,6	22	55
Линоленовая	18	30	2	53,9	0	60	5	9	18
Арахидовая	20	40	2	0,9	1,3	0	1,5	0,7	1
Ейкозеновая	20	38	2	0	0	0	0	0	1
Еруковая	22	42	2	0	0	0	0	20,26	0
Нервоновая	24	46	2	0	0	0	0	0,95	0

Примечание: I – подсолнечное масло; II – кокосовое масло; III – льняное масло; IV – соевое масло; V – рапсовое масло; VI –конопляное масло.

Выявление [3] особенностей в физических свойствах биодизеля на основе конопляного масла, в частности меньшая на 10-15% вязкость, несмотря на большую 1-2% плотность и поверхностное натяжение, позволило в конечном итоге расширить [7] диапазон подбора и регулирования параметров топливной аппаратуры при управлении процессом топливоподачи биодизельного топлива, с точки зрения согласования конструктивных параметров для обеспечения наилучших технико-экономических и экологических показателей. Выявленные особенности физико-химических свойств (табл. 1) в первую очередь необходимо отнести к различному углеводородному составу. Указанная разница в химическом составе приводит к особенностям в химических свойствах, выраженных в меньшей условной энергии активации топливно-воздушной смеси распыленного конопляного масла и сжатого воздуха, которая может быть определена по ранее разработанной методике [8] с учетом меньших температур воспламенения топлива. Как показывает рисунок 2 б, энергия активации топливовоздушной смеси из растительного масла зависит от суммарного углеводородного числа топлива. Последняя зависимость может быть хорошо представлена линейной аппроксимацией для топлив на основе растительных масел с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,9994$:

$$E_a(C+H) = 648133(C+H) - 550957, \text{ Дж/моль}, \quad (2)$$

где $E_a(C+H)$ – аппроксимационная функциональная взаимосвязь энергии активации топлива;

$(C+H)$ – суммарный процент углерода и водорода в топливе (углеводородное число).

Низшая теплота сгорания топлива H_u определялась по формуле Менделеева в зависимости только от химического состава (табл. 1)

$$H_u = (81 \cdot C + 246 \cdot H - 26 \cdot O) \cdot 4,19, \text{ Дж/кг}, \quad (3)$$

где C – массовая доля углерода, %;

H – массовая доля водорода, %;
 O – массовая доля кислорода, %.

В настоящее время исследователи [6, 7] рекомендуют увеличивать цикловую подачу, что приводит к увеличению максимального давления цикла и увеличению удельного расхода топлива и в тоже время при уменьшении эмиссии NO_x с одновременным ростом эмиссии сажи [6]. В зависимости от вида биодизеля, а также его физико-химических свойств топлива на его основе (рис. 2), характер изменений в индикаторных показателях рабочего процесса по отношению к дизельному топливу может быть различен. При этом в ходе моделирования цикловая подача, давление впрыска и время открытия соленоидов определялись в соответствии с заложенными фирмой Bosch в блок матрицами управления цикловой подачей, давлением впрыска и продолжительностью открытия соленоидов (рис. 3), а расчет производился по методикам определения технико-экономических (индикаторная мощность, индикаторный удельный расход топлива) [9, 11, 12] и экологических (эмиссия NO_x) [9, 11] индикаторных показателей рабочего процесса дизеля с определением среднего диаметра капель топлива по формулам, предложенным в [3].

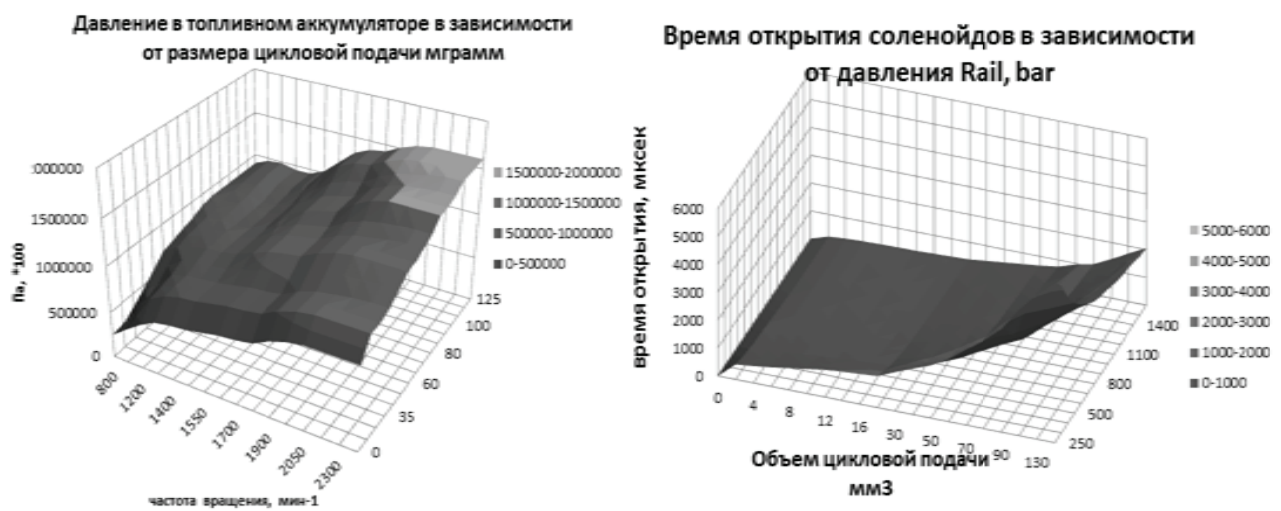


Рис. 3. Матрицы управления цикловой подачей топлива

Расчет индикаторных показателей рабочего процесса производился для режима максимального крутящего момента, соответствующего одному из режимов испытаний по 13-ти ступенчатому ездовому циклу. Для указанного режима приводится следующий набор исходных данных (табл. 2), значение которых не изменялось при определении индикаторных показателей рабочего процесса с изменением состава топлив.

Таблица 2

Исходные данные расчетного режима

Параметр	Размерность параметра	Значение параметра
Давление наддува	МПа	0,207
Температура после промежуточного охладителя	°С	44
Индикаторная мощность	кВт	83,4
Частота вращения	мин ⁻¹	1500
Угол опережения впрыска топлива	градус поворота коленчатого вала до ВМТ	3
Степень сжатия	–	15,1

Использование в рабочем процессе биодизеля на основе растительных масел с различным углеводородным числом (табл. 1) и различными физическими свойствами (вязкость,

плотность, поверхностное натяжение) (табл. 3) приводит к изменению его низшей теплоты сгорания (2), теплоты испарения, энергии активации топлива и стехиометрического числа. Это может привести к изменению технико-экономических и экологических показателей в зависимости от вида растительного масла, его углеводородного числа и в конечном счете физико-химических свойств данного топлива.

Таблица 3

Результаты расчета индикаторных показателей рабочего процесса биодизеля на основе различных типов растительных масел

Показатель	Размерность	Метилловый эфир растительных масел					
		Подсолнечное	Кокосовое	Льняное	Соевое	Рапс	Конопля
Hu	кДж/кг	36683	35590	36526	36919	37310	36768
¹ Qисп	Дж/кг	81,27	0	82,54	80,04	89,8	79,9
¹ Ea	Дж/моль	22688	0	23045	22375	26247	22275
Lo	кг/кг	12,27	11,8	12,229	12,35	12,48	12,37
Mo	моль/моль	0,424	0,411	0,423	0,4275	0,432	0,423
Дин.Вязк	Па/сек	0,00224	0,0016	0,002242	0,00237	0,0026	0,00228
Кинем.Вязк	мм ² /сек	1,95	1,41	1,903	2	2,2	1,93
Плотность	кг/м ³	870	877	850	841	841	845
Поверх. Натяг	мН/м	27,53	30,7	27,85	26,95	24,23	27,32
% углерод		0,771	0,729	0,774	0,768	0,771	0,769
% водород		0,114	0,121	0,112	0,117	0,119	0,115
% кислород		0,115	0,149	0,115	0,114	0,109	0,115
Цикл.подача	грамм	0,1065	0,136	0,106	0,105	0,1075	0,106
Давление впрыска	МПа	114	127	113	112,6	113,85	113,15
Прод-ть впрыска	град. п.к.в.	17,49	22	17,48	17,05	17,94	17,59
Ср. диаметр капли	мкм	12,9	11,8	12,3	12,7	12,9	12,8
Nox	г/час	823	405	812	832	832	816
Ne	кВт	82,6	82,8	82,4	82,7	82,8	82,8
ge	г/кВт*час	230,1	295	231,4	228	231	229

Примечание 1: значения определялись для растительного масла

Сравнение индикаторных показателей по результатам моделирования (табл. 3) предложено проводить из условия постоянства мощности в ходе вычислительного эксперимента путем соответствующего увеличения цикловой подачи топлива относительно ее уровня при работе двигателя на дизельном топливе.

В ходе моделирования индикаторных показателей (табл. 3) производился анализ промежуточных результатов расчета индикаторных показателей рабочего процесса, таких как, например – скорость сгорания топлива (рис. 4 а), индикаторное давление (рис. 4 б) и средняя температура (рис. 4 в) в цилиндре, теоретическая температура пламени (рис. 4 г), концентрация свободного кислорода (рис. 4 д), на основании которого выявлены наиболее существенные факторы, определяющие характер динамики активного тепловыделения и влияющие в конечном итоге на индикаторные показатели. Рассмотрение этого вопроса в данной работе производится с точки

зрения развивающейся теории управляемого сгорания. Это позволит в дальнейшем предсказать оптимальный химический состав топлива по углеводородному составу.

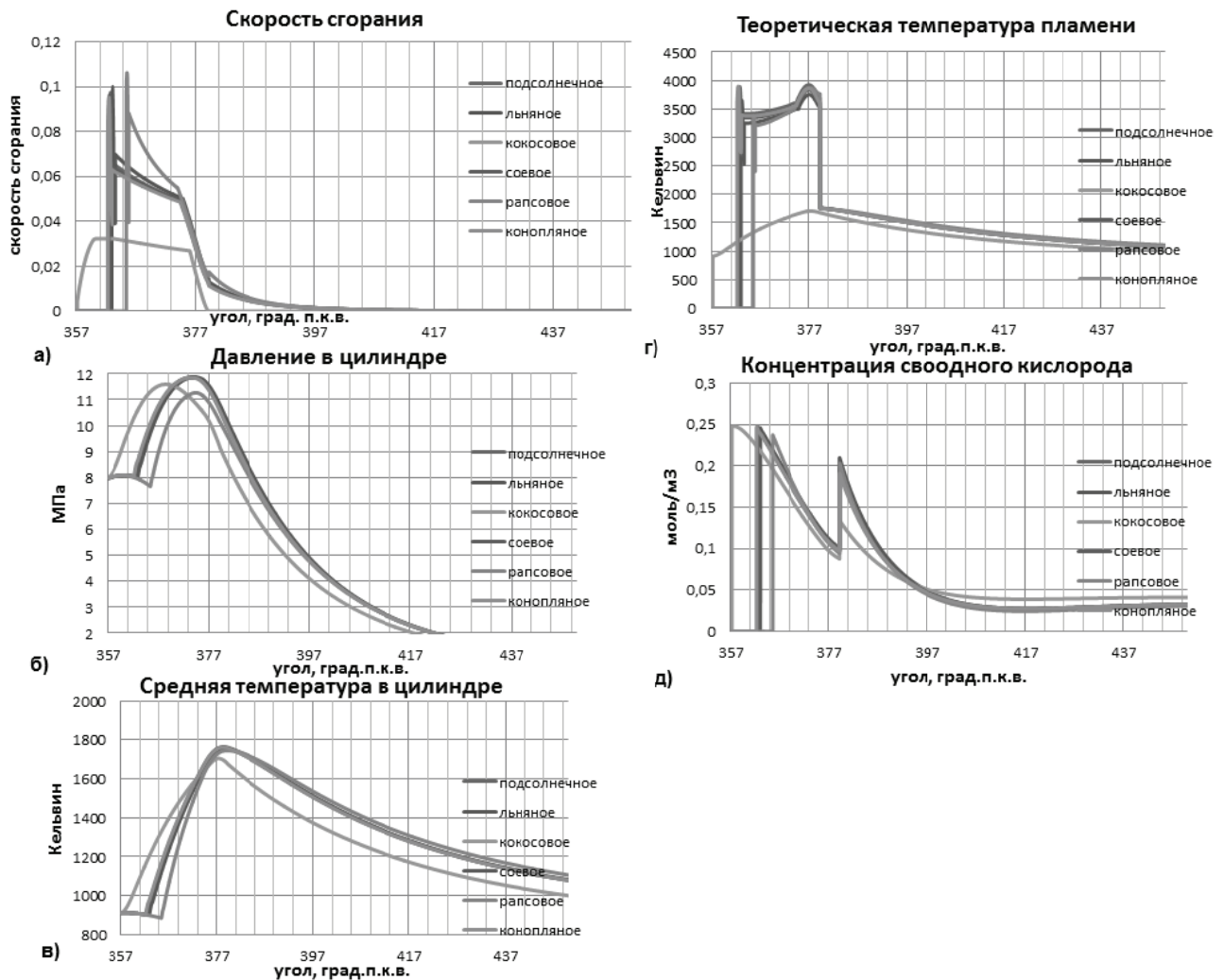


Рис. 4. Моделирование промежуточных показателей процесса сгорания при применении биодизеля из различных масел для фиксированной цикловой подачи при фиксированной цикловой подаче $93,7 \text{ мг}$ и углом опережения впрыска топлива $\theta = 3$ град. до в.м.т. на режиме максимального крутящего момента при частоте вращения коленчатого вала двигателя $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$

Анализ промежуточных результатов моделирования индикаторных показателей рабочего процесса установил основные факторы, влияющие на рабочий процесс дизеля при использовании в качестве биодизеля различных масел. Это энергоэффективность топлива, оцениваемая по нижней теплоте сгорания, тепловые потери в ходе сгорания и интенсивность процессов сгорания топлива. Уменьшение нижней теплоты сгорания от рапсового масла к кокосовому приводит к необходимости увеличения цикловой подачи в целях поддержания заданной мощности на расчетном режиме. Увеличение цикловой подачи приводит к большему количеству паров топлива, накопившихся за период задержки самовоспламенения [12], за счет концентрации которых в камере сгорания поддерживается в последующие периоды [9] распространение горения.

Последнее приводит к интенсификации тепловыделения в первый период [9] сгорания топлива, когда скорость поршня минимальна, и, как правило, к увеличению максимального давления цикла вблизи ВМТ и одновременному уменьшению скорости сгорания топлива и падения давления на последующих его этапах с большей скоростью изменения объема цилиндра. Таким образом, повышение энергоэффективности топлива и увеличение его нижней

теплоты сгорания в общем случае приводит к увеличению индикаторного КПД двигателя и снижению удельного индикаторного расхода топлива.

Наряду с низшей теплотой сгорания топлива на эффективность его сгорания оказывает влияние также фактор наличия тепловых потерь в процессе сгорания, величину которых в теории управляемого сгорания некоторые исследователи [14] предлагают оценивать посредством коэффициента адиабатности рабочего процесса. Наличие тепловых потерь неизбежно вследствие существующих законов термодинамики, рост которых зависит от степени прева-

лирования скорости изменения температуры $\frac{dT}{d\varphi}$ над скоростью изменения массы газов $\frac{dG_{\Gamma}}{d\varphi}$ и их молекулярного состава $\frac{dR_{\text{см}}}{d\varphi}$ в цилиндре при сгорании топлива, оценить которое можно

из дифференциального уравнения Менделеева-Клайперона:

$$\frac{dL_{\text{мех}}}{d\varphi} = p \frac{dV}{d\varphi} = \left(R_{\text{см}} \frac{dG_{\Gamma}}{d\varphi} T + \frac{dR_{\text{см}}}{d\varphi} G_{\Gamma} T \right) + R_{\text{см}} G_{\Gamma} \frac{dT}{d\varphi}, \quad (4)$$

где $\frac{dL_{\text{мех}}}{d\varphi}$ – скорость приращения по углу поворота коленчатого вала механической

работы в цилиндре;

$R_{\text{см}}$ – газовая постоянная смеси;

G_{Γ} – масса газов в цилиндре;

T – температура газов в цилиндре

$\frac{dR_{\text{см}}}{d\varphi} G_{\Gamma} T$ – составляющая приращения механической работы за счет молекулярного

изменения рабочей смеси;

$R_{\text{см}} \frac{dG_{\Gamma}}{d\varphi} T$ – составляющая приращения механической работы за счет приращения

массы газов рабочей смеси;

$R_{\text{см}} G_{\Gamma} \frac{dT}{d\varphi}$ – составляющая приращения механической работы за счет изменения тем-

пературы газа.

Исходя из условия обеспечения равной мощности, при переходе на другое топливо можно записать

$$\int \frac{dL_{\text{мех}}}{d\varphi} d\varphi = \text{const} = \int \left(\left(R_{\text{см}} \frac{dG_{\Gamma}}{d\varphi} T + \frac{dR_{\text{см}}}{d\varphi} G_{\Gamma} T \right) + R_{\text{см}} G_{\Gamma} \frac{dT}{d\varphi} \right) d\varphi. \quad (5)$$

Анализ формулы (5) показывает, что одна и та же развиваемая в цилиндре мощность может быть обеспечена за счет разных составляющих $\frac{dR_{\text{см}}}{d\varphi} G_{\Gamma} T$, $R_{\text{см}} \frac{dG_{\Gamma}}{d\varphi} T$, $R_{\text{см}} G_{\Gamma} \frac{dT}{d\varphi}$. Тепловые потери при одинаковой мощности будут меньше для такого процесса сгорания топлива, для которого составляющая приращения механической работы по температуре $R_{\text{см}} G_{\Gamma} \frac{dT}{d\varphi}$ будет меньшей. В этом случае механическая работа в цилиндре обеспечивается в большей степени за счет составляющих $\frac{dR_{\text{см}}}{d\varphi} G_{\Gamma} T$, $R_{\text{см}} \frac{dG_{\Gamma}}{d\varphi} T$, а рабочий процесс сгорания поддерживается в большей степени за счет химического потенциала рабочего тела. На рисунке 5 пред-

ставлены температурные составляющие скорости приращения механической работы по углу поворота коленчатого вала для различных топлив.

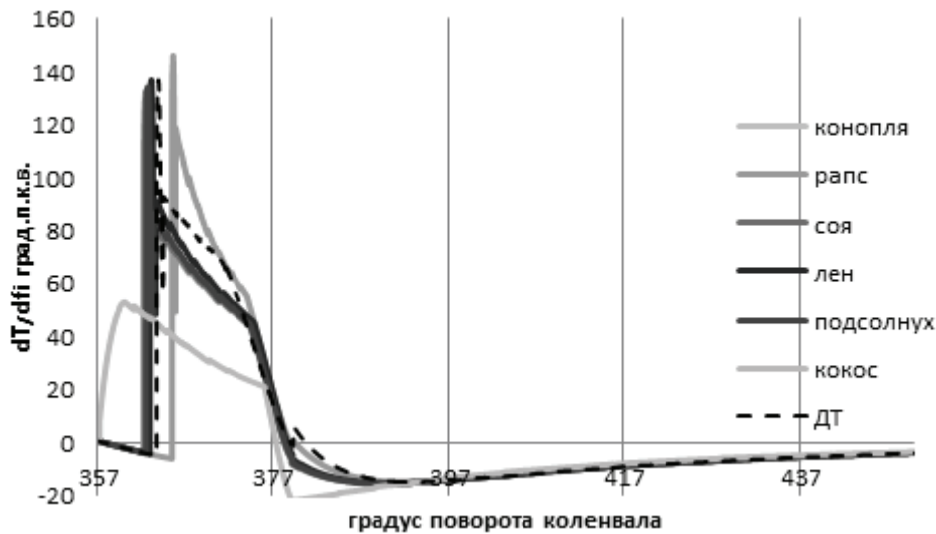


Рис. 5. Температурные составляющие скорости приращения механической работы в цилиндре для биотоплив из различных масел

Исходя из рисунка 6 можно отметить, что максимальные температурные потери будут иметь место в случае сгорания рапсового масла в цилиндре дизеля, а наименьшие – в случае сгорания кокосового масла. Это отражается в сравнительном увеличении индикаторного расхода топлива, а также эмиссии NO_x в цилиндре, несмотря на максимальную для рапсового масла низшую теплоту сгорания и наилучшую энергоэффективность рапсового биотоплива по сравнению с другими растительными маслами. Уменьшение тепловых потерь для льняного, соевого, подсолнечного и кокосового масла может быть связано либо с изменением регулировок рабочего процесса, в частности угла опережения впрыска топлива (что в данной работе не рассматривалось), либо за счет уменьшения энергии межмолекулярных связей (энергии активации), которая как показано на рисунке 2 б прямопропорционально зависит (2) от суммарной массовой доли углерода и водорода в топливе (углеводородного числа топлива). В тоже время при горении топлива в цилиндре, согласно квантовой теории строения вещества, значительная часть энергии H_u высвобождается из разрывающихся в ходе химического процесса сгорания межмолекулярных связей, количество которых в теории двигателей внутреннего сгорания условно оценивается массовой долей углеводородов в топливе (углеводородным числом). Это означает, что общее уменьшение этой энергии будет приводить и к уменьшению выделяемой энергии H_u – низшей теплоты сгорания топлива и, соответственно, к более существенному ухудшению экономичности из-за необходимости большего количества топлива на единицу работы. Этот эффект наблюдается для рабочего процесса на кокосовом масле, энергия разрыва межмолекулярных связей которого очень незначительна при температуре порядка 420 С в момент начала впрыска топлива. Таким образом, существует некоторый оптимум для энергии разрыва межмолекулярных связей в топливе, который при сохранении внешних условий воспламенения капли (температуры и давления газа, химической активности окислителя) определяет энергию активации топливно-воздушной смеси.

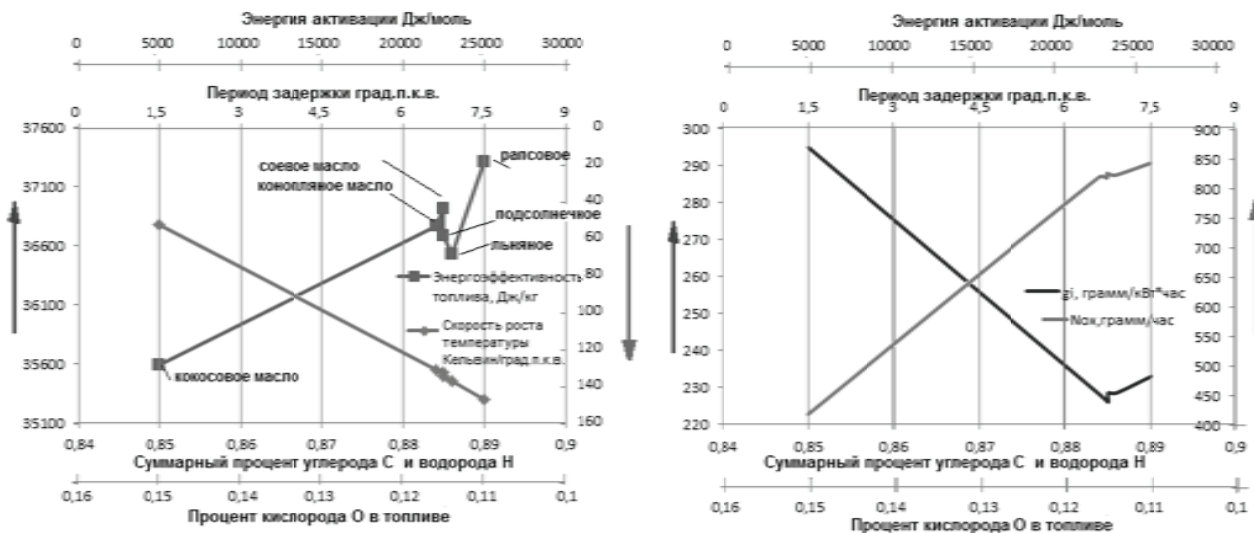


Рис. 6. Диаграмма выбора массовой доли углеводородов в зависимости от углеводородного числа биотоплива из растительных масел (табл. 1)

Выводы

В качестве критерия приближения к вышеописанному оптимуму физико-химических свойств биодизеля из различных растительных масел (табл. 1) предлагается отношение энергии H_u к энергии разрыва межмолекулярных связей E_a

$$k_{\text{топл}} = \frac{H_u}{1000} \cdot \frac{1}{E_a}. \tag{6}$$

Наиболее близким к вышеописанному оптимуму является соевое и конопляное масла, обладающие минимальной энергией активации при максимально возможной энергоэффективности топлива, оцениваемой в данной работе по низшей теплоте сгорания топлива (рис. 7).

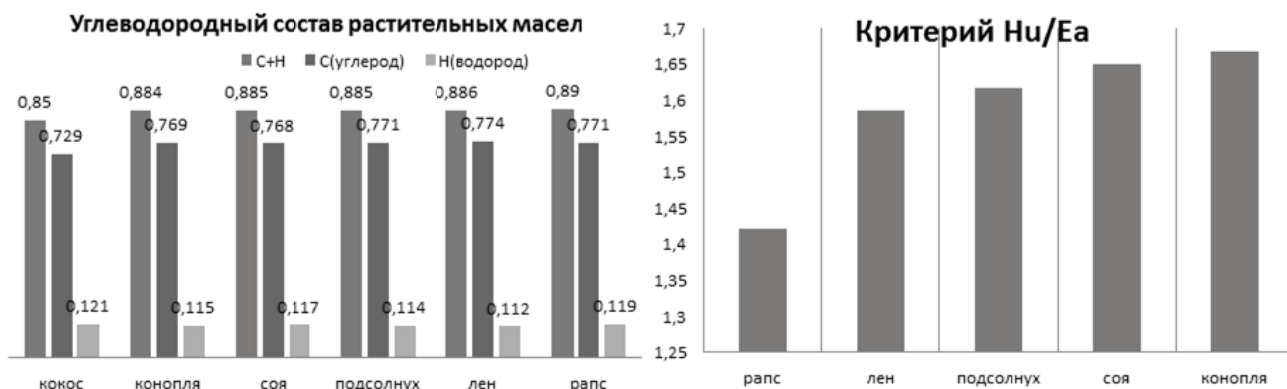


Рис. 7. Критерий H_u/E_a для различных видов биотоплив

Соответственно углеводородный состав ($C=76,8-76,9\%$ и $H=11,5-11,7\%$), которым они обладают можно считать оптимальным для данного типа двигателя и используемых регулировок рабочего процесса при применении в качестве топлив растительных масел.

При сопоставлении удельного расхода топлива экологических показателей, в частности эмиссии NO_x , предложена следующая диаграмма (рис. 6). Анализ данных на рисунке показывает, что увеличение массовой доли углеводородов в топливе сопровождается одновременно увеличением скорости роста температуры в цилиндре и увеличением эмиссии NO_x , что может ограничивать применение топлив с большей энергоэффективностью. В данном

случае требуется проводить изменения в организации рабочего процесса (угол опережения впрыска топлива) с целью уменьшения тепловых потерь в ходе процесса сгорания, что повлечет смещение точки пересечения кривых вправо (рис. 6).

Список литературы

1. Колодницька, Р.В. Перспективи застосування олії як добавки до палива для дизельних двигунів / Р.В. Колодницька // Матеріали XII Міжнар. науково-техніч. конф. – Севастополь, 2009.
2. Семенов В.Г. Перспективы применения на Украине альтернативных видов топлива на основе растительных масел [Электронный ресурс] / В.Г. Семенов//ООО «Научно исследовательский институт альтернативных топлив». – Режим доступа: http://www.semenovv.kharkiv.com/p_42.html.
3. Колодницька Р.В. Моделювання розпилювання біодизельного палива на основі конопляної олії / Р.В. Колодницька // Вісник СХУ ім. Володимира Даля. – 2010. – №6 (148). – С.41-46.
4. Emberger P. Examination of hemp oil with regard to its suitability as fuel for engines adapted to pure plant oil use [Electronic resource] / P. Emberger, K. Thuncke, R. Haas, E. Remmele // Nova-Institut. – Mode of access. – Режим доступа: <http://www.nova-institut.de>.
5. Семенов В.Г. Исследование физико-химических показателей альтернативного биотоплива на основе рапсового масла / В.Г. Семенов / ООО «Научно исследовательский институт альтернативных топлив». – Режим доступа: http://www.semenovv.kharkiv.com/p_42.html.
6. Кулманакон С.П. Особенности рабочего процесса дизельного двигателя при использовании смесей рапсового масла и дизельного топлива [Электронный ресурс] /С.П. Кулманакон, Р.С. Семенов. – Режим доступа: http://elibr.altstu.ru/elibr/books/Files/pv2007_04/pdf/055%20kulmanakov.pdf.
7. Грехов Л.С. Топливная аппаратура и системы управления дизельными двигателями / Л.С. Грехов, Н.А. Ивашенко, В.А. Марков. – М.: Легион-Автодата, 2005. – 344 с.
8. Ноженко Е.С. Прогнозирование энергии активации топлива на основе теории теплового взрыва / Е.С. Ноженко, А.Ю. Пилатов // Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту. – 2009. – №3. – С. 27–35.
9. Разлейцев Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях / Н.Ф. Разлейцев. – Харьков: Вища школа, 1980. – 169с.
10. Global Petroleum Forum [Electronic resource] – Mode of access. – Режим доступа: <http://www.globalpetroleumclub.com/>
11. Руктешель О.С. Термодинамический метод расчета оксидов азота NOx по температурному полю внутрицилиндрового пространства высокофорсированного дизеля / О.С. Руктешель, Г.А. Вершина, А.Ю. Пилатов // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фізика-тэхн. навук. – 2007. – №4. – С.43–54.
12. Пилатов А.Ю. Прогнозирование параметров рабочего процесса при введении озона в камеру сгорания/ А.Ю. Пилатов // Локомотив информ: Международный информационный научно-технический журнал. – 2010. – № 5. – С. 30–37
13. Изобелло А.Ю. Физическая модель оптимизации теплового состояния поршня высокофорсированного дизеля/А.Ю. Изобелло, А.Ю. Пилатов// Вісті Автомобільно- дорожнього інституту. – 2010. – №1. – С.133–145
14. Кухаренко Г.М. Управляемость процесса сгорания и системы управления сгоранием топлива в дизелях / Г.М. Кухаренко, Е.А. Лазарев //Вестник БНТУ. – 2004. – № 1. – 59–65.
15. Пилатов А.Ю. Теоретическое обоснование применения озона при организации управляемого процесса сгорания топлива в транспортных дизелях / А.Ю. Пилатов, Е.С. Ноженко / Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2010. – № 6. – С. 229–234.

Рецензент: к.т.н., доц. А.В. Хімченко, АДІ ДВНЗ «ДонНТУ».

Стаття надійшла до редакції 25.05.11

© Колодницькая Р.В., Вершина Г.А., Пилатов А.Ю., 2011