

УДК 631.17:635.21

АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВНУТРИХОЗЯЙСТВЕННОГО БИОТОПЛИВНОГО ЦЕХА (НА ПРИМЕРЕ ПРОИЗВОДСТВА МОТОРНОГО ТОПЛИВА ИЗ МАСЛОСЕМЯН РАПСА)

В.А.КОЛОС¹,
канд. техн. наук,

Ю.Н.САПЬЯН¹,
зав. лабораторией,

П.М.ПУГАЧЁВ²,
канд. техн. наук

¹Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, e-mail: vim@vim.ru,

²Ассоциация «РАСПАПС», Москва, Российская Федерация

При изучении проблем производства биотоплива (БТ) из различного сырья большое значение придается энергетическим критериям: частным – ресурсоемкости, энергоемкости, энергосодержанию и обобщенным – энергозатратам, энергопотенциалу продуктов, коэффициентам полной и прямой энергоэффективности (КЭЭ и КПЭЭ) БТ-технологии. Во многих европейских странах в качестве моторного БТ широко применяют натуральное рапсовое масло (РМ), а также смесевые топлива (СТ) с добавлением нефтяного дизельного (ДТ). Выполнили расчет и анализ критериев энергоэффективности производства РМ и СТ (60 процентов ДТ) с учетом полного жизненного цикла ресурсов. Исходя из технико-экономических данных проекта БТ-цеха, разработанного ВИМ для ОАО ПХ «Лазаревское» Тульской области, получили достаточно высокие значения КЭЭ стадий непосредственной переработки маслосемян в РМ и приготовления СТ – соответственно 7,13 и 4,98 при КПЭЭ 24,2 и 61,8, а также КПЭЭ всей БТ-технологии – 8,4 и 22,3. Вариант с использованием побочного продукта (жмыха) для тепловых целей хозяйства или при производстве агропеллет на дополнительной стадии позволит довести КЭЭ РМ до 2,82, а СТ до 3,58 при КПЭЭ, соответственно, 15,6 и 40,9 процента. Показали, что эти данные свидетельствуют о высокой энергетической рентабельности производства РМ и СТ, однако по КЭЭ они уступают нефтяному ДТ (1,57 и 2,61 против 4,2). Дальнейшее повышение энергоэффективности БТ-цеха обеспечит реализация энергопотенциала второго побочного продукта БТ-технологии (рапсовой соломы) в виде отдельного энергоресурса или совместно со жмыхом. Последний вариант по энергоэффективности превосходит вариант производства РМ и СТ без энергетического применения побочных продуктов, соответственно, на 246 и 78 процентов. Для информационного обеспечения энергооценки процессов и технологий с использованием продуктов данного БТ-цеха представлены значения их энергоэквивалентов.

Ключевые слова: биотопливо, рапсовое масло, смесевое топливо, энергозатраты, энергоэффективность.

Энергоэффективность производства биотоплива (БТ) оценивают критериями, значения которых вычисляются по математическим моделям и алгоритмам, описывающим переход энергии производственных ресурсов в их полном жизненном цикле (ПЖЦ) на основные и побочные продукты стадий БТ-технологии [1]. На первой стадии получают исходную биомассу в виде продуктов возделываемых или дикорастущих энергетиче-

ских растений или различных отходов и остатков, перерабатываемых на последующих стадиях в БТ с требуемыми показателями качества.

В настоящее время во многих европейских странах в качестве моторного БТ широко применяют натуральное рапсовое масло (РМ), а также смесевое топливо (СТ) с нефтяным дизельным топливом (ДТ). Исследованиями ВИМ установлено, что при адаптации к работе на них двигателей автотрактор-

Таблица 1

ПРОЕКТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕХА ПО ПРОИЗВОДСТВУ РМ И СТ	
Показатели	Значение
Производительность, кг/ч: производства РМ приготовления СТ	70 175
Время смены, ч	14
Коэффициент выхода РМ, %	35
Коэффициент выхода жмыха, %	60
Потребность в маслосеменах, т/год: для производства РМ для приготовления СТ	600 240
Установленная мощность оборудования, кВт: в том числе: для производства РМ для приготовления СТ	47,5 43,7 3,8
Влажность семян перед отжимом, %	7
Обслуживающий персонал, чел./смена	2
Площадь производственных помещений, м ²	216

ной техники можно обеспечить энергоавтономность сельского хозяйства по ДТ и снизить себестоимость производимой продукции [2, 3]. Предлагаемые на рынке комплекты оборудования для производства БТ позволяют создавать соответствующие мини-заводы или цеха, рационально используя сложившуюся производственную инфраструктуру хозяйств, максимально приблизив к местам заготовки исход-

Материалы и методы. Расчеты провели применительно к БТ-технологии, включающей три стадии: выращивание маслосемян ярового рапса наиболее энергоэффективного сорта Сфинто [4, 5]; производство технического РМ холодного отжима; приготовление СТ в соотношении 40% РМ и 60% ДТ [6]. Маслосемена перерабатывали в БТ-цехе, проект которого разработан в ВИМ для ОАО ПХ «Лазаревское» Тульской области.

Для информационного обеспечения вычислений использовали технико-экономические характеристики БТ-цеха (табл. 1) и технологических операций (подготовка, очистка и холодное прессование маслосемян, очистка коагулянтном, фильтрация и хранение РМ, удаление побочного продукта – жмыха, приготовление и хранение СТ), паспортные данные оборудования и энергетические эквиваленты производственных ресурсов [7].

В комплект оборудования цеха включены автомобиль-самосвал ЗИЛ-ММЗ-45021, погрузчик-транспортёр шнековый ПШП-7, приемный бункер для маслосемян, нормализатор влажности Б6-МЖА-1, агрегат маслоотжимной (6 прессов КК-40), насосы CD70/12 (2 блока по 3 и 4 шт.), фильтр М8-ВУФ-1, смеситель ДТ и СТ, емкости для хранения, пневмотранспортер УПТ-6, бункер для жмыха.

Значения оценочных критериев определили, исходя из полных энергозатрат (далее – энергозатрат)

Таблица 2

РЕСУРСООЕМКОСТЬ И ПОЛНАЯ ЭНЕРГООЕМКОСТЬ РМ ПО СОСТАВЛЯЮЩИМ, ВАРИАНТАМ И ПРОДУКТАМ						
Ресурсы	Ресурсоёмкости, физ.ед./т _{РМ} *			Энергоёмкость, МДж/т _{РМ} *		
	1 вариант	2 вариант		1 вариант	2 вариант	
	РМ	РМ	жмых	РМ	РМ	жмых
Электроэнергия, кВт·ч	270,0	157,5	112,5	3456	2016	1440
Бензин, кг	12,9	4,3	8,6	702	235	467
Материалы строений, м ²	0,097	0,054	0,043	488	273	215
Металл оборудования, кг	4,14	2,34	1,80	464	262	202
Коагулянт, кг	20,0	20,0	-	106	106	-
Маслосемена, т	2,9	1,6	1,3	18428	10320	8108

*_{т_{РМ}} – 1 т РМ

ной биомассы и использования побочных продуктов ее переработки. В этой связи оценка эффективности БТ-цехов энергетическими критериями, наряду с экономическими и коммерческими, стала актуальной научно-практической задачей.

Цель исследований – оценка энергоэффективности внутрихозяйственного БТ-цеха на примере производства РМ и СТ с учетом энергозатрат на их выращивание и эффекта от использования энергopotенциала побочных продуктов.

и энергopotенциалов стадий, по двум вариантам: без энергетического использования жмыха, поскольку для производства РМ и СТ он не применим, и с его использованием в других технологиях. В первом варианте энергоёмкость стадии аккумулируется в основном продукте, во втором – распределяется между основным продуктом и жмыхом в определенном соотношении [1]. Энергозатраты стадий вычислили по их полной энергоёмкости (далее – энергоёмкости), обусловленной ресурсоёмкостью и энергоэквивалентами производственных ресурсов. Энергopotенциал стадий и всей БТ-технологии вычислили, исходя из энергосодержания продуктов. Попутно определили энергоэквиваленты продуктов, необходимые для энергооценки их последующего применения. Затем вычислили коэффициенты полной и прямой энергоэффективности (КЭЭ и КПЭЭ) стадий и всей БТ-технологии (с уче-

том выращивания маслосемян), а также индексы энергоэффективности (ИЭЭ) рассматриваемых вариантов.

Результаты и обсуждение. Анализ составляющих энергоемкости стадии производства РМ (200 т/год), рассчитанных по операционным технологическим расходам ресурсов в БТ-цехе (табл. 2), показал, что наибольшая из них обусловлена расходом электроэнергии и в первом варианте равна 3456 МДж/т_{РМ}, во втором – 56% ее величины приходится на РМ и 44% на жмых.

Примерно в таком же соотношении распределены остальные, кроме составляющей от расхода коагулянта (кизельгура), целиком относящейся к РМ. Значения ресурсоемкости и энергоемкости маслосемян получены для уборки рапса с запашкой соломой с целью восстановления плодородия почвы путем пересчета экспериментальных данных [3] на 1 т РМ.

После суммирования составляющих энергоемкость РМ по первому варианту стадии достигла 5216 МДж/т_{РМ} при энергосодержании (низшей теплоте сгорания) – 37200 МДж/т_{РМ} и энергопотенциале 7440 ГДж, что обусловило высокий фактический КЭЭ стадии – 7,13 (табл. 3).

Таблица 3			
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА РМ			
Показатели	Варианты стадий*		
	1	2	
	РМ	РМ	жмых
Энергоемкость, МДж/т	5216/23644	2892/13212	1356/6085
Энергозатраты, ГДж	1043/4729	578/2642	465/2087
Энергосодержание, МДж/т	37200	37200	17000
Энергопотенциал, ГДж	7440	7440	5830
КЭЭ	7,13/1,57	12,86/2,82	
КПЭЭ	24,2/8,4	49,3/15,6	
ИЭЭ ₂₋₁ , %	80,4/79,6		
*В знаменателе – с учетом производства маслосемян			

Однако энергоемкость всей БТ-технологии составила 23644 МДж/т_{РМ}, а КЭЭ – лишь 1,57. Вместе с тем, КПЭЭ стадии и БТ-технологии равны, соответственно, 24,2 и 8,4, то есть производитель получит многократный эффект от расходования собственных ТЭР.

Энергоемкость РМ по второму варианту стадии и БТ-технологии составила, соответственно, 2892 и 13212 МДж/т_{РМ}, КЭЭ – 12,86 и 2,82, в 2 раза вырос КПЭЭ, а ИЭЭ₂₋₁ достиг 80%.

Стадия приготовления СТ состоит из операции смешивания компонентов с перекачиванием в накопитель. Составляющая энергоемкости от расхо-

да цеховых ресурсов незначительна – 41 МДж/т_{СТ}, от расхода РМ для стадии и БТ-технологии равна, соответственно, 2086 и 9458 МДж/т_{СТ}, от расхода ДТ – 6000 МДж/т_{СТ}. После суммирования составляющих по первому варианту энергоемкость СТ для этой стадии и БТ-технологии составила 8127 и 15499 МДж/т_{СТ}. Энергосодержание СТ, исходя из низшей теплоты сгорания компонентов, равно 40500 МДж/т_{СТ}, энергопотенциал стадии – 8100 МДж, КЭЭ стадии и БТ-технологии – соответственно, 5,0 и 2,6, а КПЭЭ на порядок выше (табл. 4).

Таблица 4			
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ В СТАДИИ ПРОИЗВОДСТВА СТ			
Показатели	Варианты стадий*		
	1	2	
	СТ	СТ	Жмых
Энергоемкость, МДж/т	8127/15499	7198/11326	1356/6085
Энергозатраты, ГДж	1625/3100	1440/2265	186/835
Энергосодержание, МДж/т	40500	40500	17000
Энергопотенциал, ГДж	8100	8100	2332
КЭЭ	4,98/2,61	5,62/3,58	
КПЭЭ	61,8/22,3	117,4/40,9	
ИЭЭ ₂₋₁ , %	12,9/37,2		
*В знаменателе – с учетом производства маслосемян			

Энергоемкость СТ по второму варианту стадии и БТ-технологии составила, соответственно, 7198 и 11326 МДж/т_{СТ}, КЭЭ – 5,62 и 3,58, а ИЭЭ₂₋₁ – более 37%.

Из таблиц 3 и 4 следует, что КЭЭ производства РМ и СТ как фактические (1,57 и 2,82), так и потенциально возможные (2,61 и 3,58), существенно меньше, чем ДТ из нефти (4,20) [5]. Решить проблему повышения энергоэффективности можно за счет реализации энергопотенциала другого побочного продукта БТ-технологии – рапсовой соломой. Технологически это осуществляется путем ее уборки пресс-подборщиками в тюки, сжигания в теплогенераторах или применения, например, в качестве компонента производства агропеллет. Значения КЭЭ производства РМ и СТ в этом случае (третий вариант) равны, соответственно, 4,06 и 3,70, а при совместном использовании соломой и жмыха (четвертый вариант) – 5,44 и 4,64 (табл. 5).

Следовательно, ИЭЭ четвертого варианта относительно первого (фактического) достигнет очень высоких значений – 246% для РМ и 78% для СТ, так как вместе с энергопотенциалом соломой и жмыха на продукты других технологий перейдут энергозатраты, приходившиеся на БТ.

Для информационного обеспечения энергооценки процессов и технологий, в которых применяют-

Таблица 5

Сводные результаты расчета критериев энергоэффективности БТ-технологии по вариантам использования побочных продуктов

Критерии	1 вариант: РМ/СТ	2 вариант: РМ (жмых)/ СТ (жмых)	3 вариант: РМ (солома)/ СТ (солома)	4 вариант: РМ (солома и жмых) / СТ (солома, жмых)
КЭЭ	1,57/2,61	2,82/3,58	4,06/3,70	5,44/4,64
ИЭЭ ₂₋₁ , %	-	79,6/37,2	-	-
ИЭЭ ₃₋₁ , %	-	-	158,6/41,7	-
ИЭЭ ₄₋₁ , %	-	-	-	246,5/77,9

ся продукты БТ-цеха, получены следующие значения их энергоэквивалентов, МДж/кг:

- первый вариант: РМ – 23,64, СТ – 15,50;
- второй вариант: РМ – 13,21, СТ – 11,33, жмых – 6,08;
- третий вариант: РМ – 12,25, СТ – 11,94, солома – 1,98;
- четвертый вариант: РМ – 6,83, СТ – 9,78, жмых – 2,86, солома – 1,89.

Выводы. Внутрихозяйственный БТ-цех, разработанный по проекту ВИМ на базе технических средств, помещений, хранилищ сырья и ГСМ, энергосети, технологически увязанный с заготовкой биомассы и использованием продуктов ее переработки, обеспечит замещение нефтяного ДТ биологическими аналогами – РМ или СТ – при минимальном расходе топливно-энергетических и других производственных ресурсов.

Высокие фактические значения КЭЭ и КПЭЭ

стадий непосредственной переработки маслосемян, а также КПЭЭ всей БТ-технологии по РМ и СТ, начиная с посева рапса, свидетельствуют о многократном энергоэффекте от расходования ТЭР производителем и целесообразности создания БТ-цехов. Вместе с тем КЭЭ производства РМ и СТ значительно меньше, чем традиционного ДТ (1,57 и 2,61 против 4,2). Использование энергопотенциала жмыха в других процессах и технологиях хозяйства повышает КЭЭ РМ до 2,82, а по СТ – до 3,58.

Проблему энергоэффективности данной БТ-технологии может решить использование энергопотенциала рапсовой соломы на тепловые цели хозяйства как в виде отдельного энергоресурса, так и совместно со жмыхом. В последнем случае ИЭЭ производства РМ составит около 246%, а СТ – 80%.

Для информационного обеспечения энергооценки процессов и технологий, в которых применяются продукты рассмотренной БТ-технологии, вычислены значения их энергоэквивалентов.

Результаты расчетов энергоэффективности, полученные с учетом ПЖЦ технологических ресурсов, указывают на необходимость развития автономного топливообеспечения рапсосоющих хозяйств для экономии традиционных ТЭР не только в агрофере, но и за ее пределами.

Литература

1. Стандарт организации СТО «ВИМСТАНДАРТ» 00496194-003-2012. Энергосбережение. Метод оценки энергоэффективности переработки биомассы растений в биотопливо. – М.: ВИМ, 2013. – 59 с.
2. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сизов О.А. Перспективные пути применения энерго- и экологически эффективных машинных технологий и технических средств // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. – 2013. – № 4. – С. 8-11.
3. Кочетков М.Н., Савельев Г.С. Оценка энергоавтономности сельскохозяйственного предприятия при замене дизельного топлива на чистое рапсовое масло // *Транспорт на альтернативном топливе*. – 2010. – № 4 (16). – С. 18-21.
4. Колос В.А., Сапьян Ю.Н. К вопросу о стандартизации методов оценки энергетической эффективности производства биотоплива // *Модернизация сельскохозяйственного производства на*

базе инновационных машинных технологий и автоматизированных систем: XII Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 2. – 2012. – С. 68-72.

5. Колос В.А., Сапьян Ю.Н., Пугачёв П.М. Оценка энергоэффективности возделывания растений для производства биотоплива (на примере ярового рапса) // *«Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: Тр. Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 2. – М.: ВИЭСХ, 2014. – С. 14-19.*
6. Карташевич А.Н., Товстыка В.С., Плотников С.А. Оптимизация параметров топливоподачи тракторного дизеля для работы на рапсовом масле // *Тракторы и сельхозмашины*. – 2011. – № 3. – С. 13-16.
7. Басков В.Н., Колос В.А., Сапьян Ю.Н. Биотопливо из растительного сырья: производство, потребление, энергоэффективность // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. – 2010. – № 6. – С. 13-18.

References

1. Standart organizatsii STO «VIMSTANDART» 00496194-003-2012. *Energoberezhenie. Metod otsenki energoeffektivnosti pererabotki biomassy rasteniy v biotoplivo* [Energy saving. Method of an assessment of energy efficiency of processing of plants biomass into biofuel]. Moscow: VIM, 2013. 59 pp. (Russian).
2. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Sizov O.A. *Perspektivnye puti primeneniya energo- i ekologicheskikh effektivnykh mashinnykh tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv* [Long-term ways of using energy and environmentally efficient machine technologies and techniques], *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2013, No 4, pp. 8-11 (Russian).
3. Kochetkov M.N., Savel'ev G.S. *Otsenka energoavtonomnosti sel'skokhozyaystvennogo predpriyatiya pri zamene dizel'nogo topliva na chistoe rapsovoe maslo* [Assessment of power autonomy of the agricultural enterprise when diesel fuel substitution by pure rape oil]. *Transport na al'ternativnom toplive*. 2010. № 4 (16). pp. 18-21 (Russian).
4. Kolos V.A., Sap'yan Yu.N. *K voprosu o standartizatsii metodov otsenki energeticheskoy effektivnosti proizvodstva biotopliv* [Revisited standardization of methods of an assessment of power efficiency of biofuels production]. *Modernizatsiya sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva na baze innovatsionnykh mashinnykh tekhnologiy i avtomatizirovannykh sistem: XII Mezhdunar.nauch.-tekhn. konf. Ch. 2*. 2012. pp. 68-72 (Russian).
5. Kolos V.A., Sap'yan Yu.N., Pugachev P.M. *Otsenka energoeffektivnosti vozdeystviya rasteniy dlya proizvodstva biotopliva (na primere yarovogo rapsa)* [Assessment of energy efficiency of cultivation of plants for biofuel production (the case of a spring rape)]. *Trudy MNTK «Energoobespechenie i energoberezhenie v sel'skom khozyaystve: Trudy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Ch. 2*. Moscow: VIESKh, 2014. pp. 14-19 (Russian).
6. Kartashevich A.N., Tovstyka V.S., Plotnikov S.A. *Optimizatsiya parametrov toplivopodachi traktornogo dizelya dlya raboty na rapsovom masle* [Optimization of parameters of fuel feeding of the tractor diesel for rape oil operation]. *Traktory i sel'khozmashiny*. 2011. № 3. pp. 13-16 (Russian).
7. Baskov V.N., Kolos V.A., Sap'yan Yu.N. *Bioplivo iz rastitel'nogo syr'ya: proizvodstvo, potreblenie, energoeffektivnost'* [Biofuel from vegetable raw materials: production, consumption, energy efficiency]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2010. No. 6. pp. 13-18 (Russian).

ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY OF THE INTRAFARM BIOFUEL WORKSHOP (THE CASE OF PRODUCTION OF MOTOR FUEL FROM COLZA OILSEEDS)

Kolos V.A., Cand.Sc.(Eng.); **Sap'yan Yu.N.**, Head of Laboratory, All-Russian Research Institute of Mechanization for Agriculture, e-mail; vim@vim.ru; **Pugachev P.M.**, Cand.Sc.(Eng.), RASRAPs Association, Moscow, Russian Federation

When studying problems of production of biofuels (BF) from various raw materials the great value is attached to power criteria: particular – to resource intensity, power consumption, energy content and generalized – to energy consumption, power potential of products, coefficients of full and direct energy efficiency (CEE and CDEE) of BF-technology. In many European countries the natural rape oil (RO), and also the mixed fuels (MF) with addition of oil diesel (DF) are widely applied as motor BF. Calculation and the analysis of criteria of energy efficiency of production of RO and MF (60 percent of DF) taking into account the full life cycle of resources were carried out. Due to technical and economic data of the project of the BF-shop created by All-Russian Research Institute of Mechanization for Agriculture for JSC breeding enterprise Lazarevskoye in Tula region there were received rather high values of CEE of stages of direct oilseeds processing into RO and preparations of MF – respectively 7.13 and 4.98 by CDEE 24.2 and 61.8, and also CDEE of all BF-technology – 8.4 and 22.3. The option with use of a by-product (oil seeds cake) for the thermal purposes of economy or by fuel pellets production at an additional stage will allow increase CEE of RO to 2.82, and MF to 3.58 at CDEE respectively 15.6 and 40.9 percent. These data testify to high power profitability of production of RO and MF, however on CEE they are inferior to oil DF (1.57 and 2.61 again 4.2). Further increase of energy efficiency of BF-shop will be provided by realization of power potential of the second by-product of BF-technology (rape straw) in the form of separate energy resource or in common with cake. The last option surpasses option of production of RO and MF without power application of by-products in energy efficiency, respectively, by 246 and 78 percent. For information support of a power assessment of processes and technologies with use of products of this BF-shop values of their power equivalents are presented.

Keywords: Biofuel; Rape Oil; Mixed fuel; Power consumption; Energy efficiency.