

# АЛЬТЕРНАТИВНОЕ КОТЕЛЬНОЕ ТОПЛИВО: ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОГО ТОПЛИВА В ПРОМЫШЛЕННЫХ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

В последние годы отмечается устойчивый рост интереса к энергетическому использованию биологического топлива: животного жира, растительного и рапсового масла, биологического дизельного топлива, и особенно глицерина. Это связано с объективной необходимостью радикального снижения выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу из-за парникового эффекта и постоянным ростом цен на традиционное котельное топливо: природный газ, дизельное топливо и мазут. Правильный выбор технологии сжигания становится решающим фактором для широкого применения биологического топлива в промышленной и коммунальной энергетике. В статье рассмотрены возможности и проблемы энергетического использования жидкого биологического топлива, характер процесса горения различных видов биологического топлива.

## Сжигание животного жира

Проблема сжигания животного жира в котельных установках в Европе стала актуальной в конце 1990-х годов в связи с массовым падежом скота из-за заражения чумой. Решающий вклад в решение проблемы использования животного жира в качестве котельного топлива внесла немецкая компания SAACKE (ЗААКЕ) из г. Бремена. Первый объект с горелками SAACKE на животном жире появился в Германии в г. Bielefeld. С тех пор в Европе было введено в эксплуатацию более 30 котельных, использующих в качестве основного топлива животный жир. Исследования, проведенные в испытательном центре компании SAACKE, показали, что для экономичного и надежного сжигания животного жира необходимо хорошее качество распыления, использование высококачественных материалов из стали для топливопроводов и арматуры, специальное исполнение горелки, запальника, подогревателя и насосной станции. При выборе способа распыления жира (механический, паромеханический или ротационный) победил хорошо зарекомендовавший себя на практике ротационный способ. Его основные преимущества:



а)



б)

а) Жаротрубный котел с горелками SKV-SF фирмы SAACKE в специальном исполнении на животном жире и дизельном топливе;

б) Система подачи животного жира к горелкам SKV-SF.

- высокое качество распыления до кинематической вязкости жира – макс. 45 мм<sup>2</sup>/с (для механической и паромеханической форсунок – макс. 12 мм<sup>2</sup>/с);
- более низкая температура нагрева перед распылом;
- более низкое давление топлива перед форсункой – макс. 3 бара;
- большие нечувствительные к качеству топлива диаметры трубопроводов, регулирующей и запорной арматуры, распылительной форсунки. Фильтры тонкой очистки не требуются.

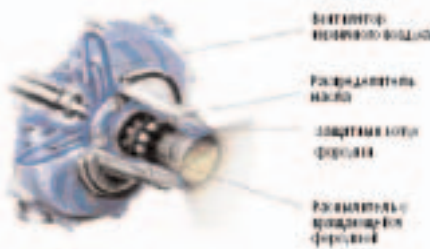


Рис. 2. Устройство ротационной форсунки

Основными элементами ротационной форсунки (рис. 2) являются ротационный вал с расположенным на нем распылительным стаканом и компрессорным аппаратом и статор с системой подвода сжатого воздуха. Жидкое топливо через группу отверстий подается во вращающийся с высокой скоростью стакан (до 6500 об/мин.), под действием центробежной силы распределяется тонкой пленкой по внутренней стенке стакана, и благодаря его конической форме перемещается к краю. Пленка вначале отбра-

сывается от края форсунки в почти радиальном направлении, а потом разделяется на капли под действием распыливающего воздуха, поступающего через щель между статором и ротором ротационной форсунки. Одновременно направление движения капель перераспределяется в осевом направлении под нужным углом распыления.

При сжигании жидкого топлива процессу горения предшествует испарение с поверхности капель, после чего начинается процесс горения гомогенной смеси паров топлива и воздуха. Скорость сгорания жидкого топлива определяется скоростью его испарения с поверхности капли. Важнейший этап подготовки жидкого топлива к сгоранию – его распыление на мельчайшие капли. Мелкие частицы (размером в несколько микрон) прогреваются, воспламеняются и сгорают значительно быстрее, чем крупные частицы, имеющие максимальный размер в сотни микрон. У ротационных форсунок качество распыления выше, чем у механических и паромеханических.

Для ротационных форсунок диаметр капли определяется эмпирически по формуле [1]:

$$\delta = 0,119 \frac{Q^{0,1} \sigma^{0,5}}{N d^{0,5} P_L^{0,4} V_L^{0,1}}$$

где:

- δ – средний медианный диаметр мкм;
- Q – расход жидкого топлива м<sup>3</sup>/с;
- N – частота вращения ротационного стакана, м;
- d – диаметр ротационного стакана, м;

$\sigma$  – сила поверхностного натяжения, кг/с<sup>2</sup>;  
 $P_L$  – плотность топлива кг/м<sup>3</sup>;  
 $V_L$  – коэфф. кинематической вязкости топлива, м<sup>2</sup>/с.

На практике для ротационных форсунок – составляет менее 50 мкм.

При комбинированном исполнении горелок наряду с животным жиром могут сжигаться пищевые отходы, растительные жиры, дизельное топливо, мазут, природный газ, биогаз и др. топлива.

Основные характеристики животного жира, сжигаемого ротационными горелками:

- теплота сгорания ~ 36 МДж/кг;
- колебания теплоты сгорания ± 10%;
- вязкость ≤ 40 мм<sup>2</sup>/с;
- количество механических примесей ≤ 0,1 масс. %;
- размер механических примесей ≤ 250 мкм;
- обводненность ≤ 0,1 масс. %;
- зольность ≤ 0,03 масс. %;
- содержание азота в жире ≤ 500 мг/кг.

NOx при сжигании животных жиров является рециркуляция дымовых газов в топку котла, позволяющая снизить температуру факела и концентрацию O2 в топке. Фактические выбросы NOx горелками SKV-SF приведены на рис. 3.

**Сжигание растительного жира**  
 Растительные жиры по сравнению с дизельным топливом имеют более высокую вязкость. В их составе присутствуют жирные кислоты, оказывающие негативное химическое коррозионное воздействие на материал трубопроводов и арматуры горелочного устройства. Сложные молекулярные структуры с длинными углеводородными цепочками требуют более высоких температур для выгорания коксовых частиц. Сжигание растительных жиров сопровождается более интенсивным сажеобразованием, чем при сжигании продуктов переработки нефти.

Состав и характеристики топлив растительного происхождения могут значительно меняться в зависимости от типа исходного сырья и

ва (рис. 4). Высокая температура воспламенения и замедленный выход летучих ухудшают тепловой баланс воспламенения, затрудняют розжиг. Для надежного розжига горелки и устойчивого горения необходимо поддерживать температуру в топке выше температуры воспламенения горючей смеси. Электрический розжиг является неэффективным.

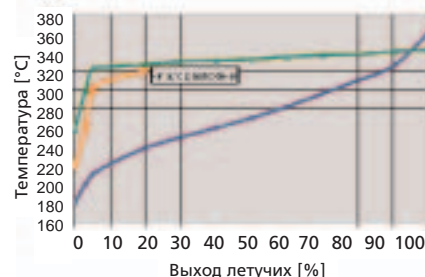


Рис. 4. Кривые выхода летучих (синий – дизельное топливо, оранжевый – рапсовое масло, зеленый – биодизельное топливо)

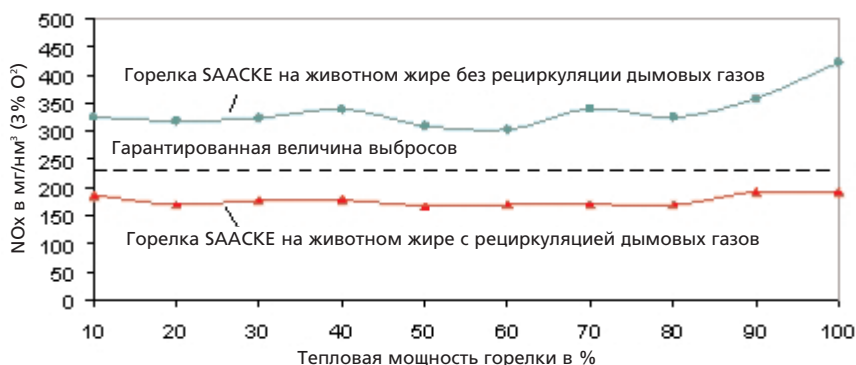


Рис. 3. Уровень выбросов NOx горелки SKV-SF в зависимости от нагрузки

Одной из важнейших проблем сжигания топлив является подавление оксидов азота, образующихся в процессе горения и наносящих значительный экологический вред атмосфере.

Опыт компании SAACKE показал, что наиболее эффективным мероприятием по снижению выбросов

отличны от дизельного топлива (табл. 1). Поэтому расчет форсунок и выбор параметров на входе в горелку для сжигания каждого из этих топлив должен быть индивидуальным.

Кривые выхода летучих для рапсового масла и биодизеля отличаются от кривых для дизельного топли-

**Глицерин как котельное топливо. Проблемы и опыт сжигания**

Технология производства биологического дизельного топлива основана на переэтерификации – химической реакции между жиром (растительного или животного происхождения) и спиртом в присутствии катализатора. Продуктами реакции являются моноэфиры (метилловые эфиры жирных кислот – биодизель) и глицерин.

Интерес к глицерину как котельному топливу обусловлен прежде всего его относительной дешевизной (табл. 2) и стремительным ростом объемов производства.

В зависимости от степени очистки выделяют три основных вида глицерина: как отход производства, неочищенный, технический. Их составы приведены в табл. 3. В качестве котельного топлива обычно применяются глицериносодержащие отходы и неочищенный глицерин как наиболее дешевые.

Характеристики глицерина резко

Таблица 1. Основные характеристики растительных жиров

	Плотность при 15°C кгм <sup>3</sup>	Теплота сгорания, МДж/кг	Вязкость кинематическая при 20°C мм <sup>2</sup> /с	Температура застывания °C	Температура вспышки, °C
Дизтопливо	840	42,7	4-6	-	80
Рапсовое масло	920	37,6	74,0	0- -3	317
Подсолнечное масло	930	37,1	66,0	-16- -18	316
Соевое масло	930	37,1	63,5	-8- -18	350
Льняное масло	930	37,0	51,0	-18- -27	-
Оливковое масло	920	37,8	83,8	-5- -9	-
Хлопковое масло	930	36,8	89,4	-6- -14	320
Кокосовое масло	870	35,3	21,7 <sup>1)</sup>	14- 25	-
Пальмовое масло	920	37,0	29,4 <sup>1)</sup>	27- 43	267

отличаются от характеристик других видов жидких топлив, в частности от дизельного топлива (табл. 4). Большие плотность и сила поверхностного натяжения капель негативно влияют на качество распыления. Для генерирования процесса испарения с поверхности капель необходим интенсивный прогрев. Низкая теплота сгорания понижает интенсивность горения. Наличие в глицерине воды приводит, с одной стороны, к улучшению качества распыления, с другой – оказывает негативное влияние на устойчивость горения.

Опыты, проведенные немецкой компанией SAASKE, показали, что стабильное горение глицерина возможно при условии применения «подсветки». Для реализации задачи сжигания двух жидких топлив в одном факеле узел ротационной форсунки в горелке SKV-SF оснащается дополнительным устройством подвода второго жидкого топлива. Для «подсветки» может использоваться алкоголь (метанол и этанол), дизельное топливо, мазут, газообразное топливо.

Сжигание глицерина, в состав которого входит около 15% метанола, может осуществляться без «подсветки». Прогрев метанола до начала воспламенения выделяющихся летучих осуществляется при бо-

лее низких температурах. За счет теплоты, выделившейся при сгорании летучих метанола, происходит разогрев капель глицерина с последующим воспламенением гомогенной смеси паров топлива с воздухом.

При выборе температуры подогрева глицерина решающую роль играет температура кипения компонентов, входящих в его состав (табл. 5). Из-за низких температур кипения метанола и этанола может возникнуть угроза взрыва паров при появлении источника воспламенения в момент пуска котельного агрегата. Поэтому горелки должны изго-

тавливаться во взрывозащитном исполнении.

Глицерин является высоковязким топливом (рис. 5) и требует подогрева перед подачей в горелки. В неочищенном глицерине температура его нагрева ограничивается, как правило, наличием воды. При

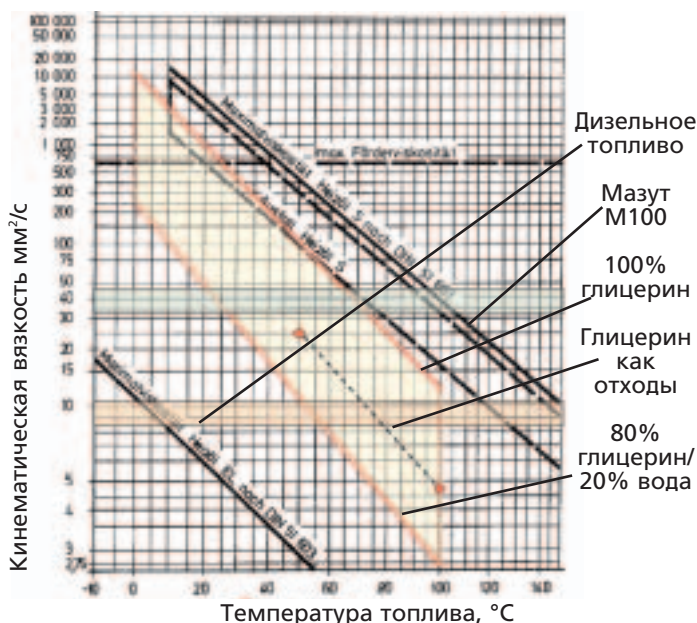


Рис. 5. Диаграмма вязкости нефтепродуктов и глицерина

Таблица 2. Стоимостное сравнение биологического топлива с нефтяным

Топливо		Неочищенный глицерин	Животный жир	Пальмовое масло	Дизтопливо
Теплота сгорания	МДж/кг	18	36	36	42,5
Стоимость	EUR/т	50	200	425	635

По данным европейских источников информации на 2007 год

Таблица 3. Типы и состав глицерина

Массовое содержание, %	Глицерин C <sup>3</sup> H <sup>5</sup> O <sup>3</sup>	Метанол CH <sup>3</sup> OH	Ароматические вещества C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> O <sub>z</sub>	Соли, напр. NaCl, R-COONa	Вода H <sup>2</sup> O
Глицерин как отход производства	40–55	10–25	0–10	3–30	0–15
Неочищенный глицерин	>80	<0,5	0–5	0–5	10–15
Технический глицерин	>99,5	–	Сульфатная зола max: 0,01		–

Таблица 4. Основные характеристики жидких топлив

Топливо		Метанол	Этанол	Глицерин	Рапс	Биодизель	Дизельное топливо
Плотность (20°C)	кг/м <sup>3</sup>	790	790	1260	910	880	860
Вязкость (20°C)	мм <sup>2</sup> /с	0,7	1,5	1176	75	6–8	6
Поверхн. натяжение	10 <sup>-3</sup> дж/м <sup>2</sup>	22	23	63	31	30	28
Теплота сгорания	МДж/кг	19,4	27,0	18,0	35,3	35,6	42,5
Температура воспламенения	°C	11	12	>180	>200	>110	>55
Скрытая теплота парообразования	кДж/кг	1100	842	825	–	–	260

Таблица 5. Температура кипения и плотности компонентов неочищенного глицерина

Компонент	Температура кипения, °С	Плотность, кг/ м <sup>3</sup>
Метанол	65	780
Этанол	78	780
Вода	100	1000
Глицерин	290	1260

переходе воды в парообразную фазу может возникнуть опасность кавитации. При испарении воды внутри ротационного стакана инертный пар попадает в ядро факела, что может негативно сказаться на стабильности пламени из-за возникновения охлаждающего эффекта. Поэтому рекомендованная температура нагрева водосодержащего глицерина – 95°С. Различия в плотности различных компонентов, из которых состоит глицерин, могут привести при длительном хранении к расслоению. Во избежание подобных случаев рекомендуется непрерывная рециркуляция (гомогенизация) глицерина в кольцевом трубопроводе.

Из-за наличия в глицерине солей возможно возникновение загрязнений в системе газоходов котла. Необходима специальная конст-

рукция котла для решения проблемы чистки поверхностей теплообмена.

Выбросы NOx при сжигании глицерина ниже, чем при сжигании дизельного топлива, вследствие меньшей интенсивности тепловыделения. Экспериментальные исследования, проводимые в испытательном центре фирмы SAACKE в г. Бремене показали, что эмиссия NOx при горении в одинаковых условиях на глицерине ниже на 30%. Жидкие биологические топлива являются наиболее экономически и экологически эффективной альтернативой топливам, получаемым из нефти. Их сжигание стандартными горелочными устройствами проблематично и требует инновационных конструктивных решений в схемах подачи и сжигания.

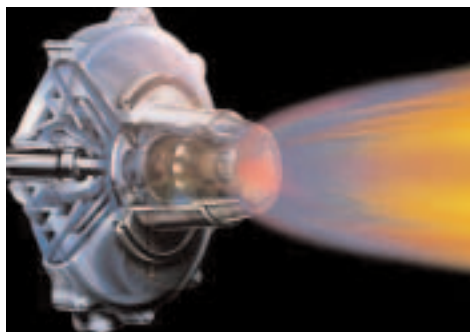
Литература:

1. Отчет инженерного центра SAACKE GmbH, 2006.
2. DIRECTIVE 2003/30/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 8 May 2003 on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport.
3. Reinhardt, G. A.: CO<sub>2</sub>-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe: Eine Bestandsaufnahme, Heft R 523 (2004) Informationstagung Motoren, Frühjahr 2004, Frankfurt.
4. Remmele, E.; K. Thuneke; B. Widmann; T. Wilharm und H. Schon (2000): Begleitforschung zur Standardisierung von Rapsöl für planzenölaugliche Dieselmotoren in Fahrzeugen und BHKW – «Gelbes Heft 69». München: Bayrisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Eigenverlag, 217 Seiten.
5. Cerbe, T. (2002): Senkung der Emissionen eines PKW mit direkt einspritzendem Dieselmotor durch Verwendung von Kraftstoffen mit abgestimmtem Siede – und Zündverhalten, Dissertation an der Universität Hannover, Fachbereich Chemie.

Д.Н. ЛОЗИЦКИЙ, инженер;  
Б.А. СОКОЛОВ, канд. техн. наук

**Фирма SAACKE GmbH, г. Бремен Германия, занимается разработкой, производством и поставкой промышленных горелочных устройств 1-134 МВт на любом виде жидкого, газообразного и твердого топлива (факельное сжигание) для паровых и водогрейных котлов и нагревательных печей, а также производством генераторов горячих газов (воздухоподогревателей) для применения в промышленных технологиях (сушка, термическое обезвреживание жидких и газообразных отходов, нагрев материалов).**

Все горелочные устройства сертифицированы в системе ГОСТ Р. Газовые и комбинированные горелки разрешены к применению в РФ Федерально службой технологического надзора. Свою деятельность в России фирма SAACKE осуществляет с 1998 г. через представительство, аккредитованное в Министерстве юстиции и ООО «ЗААКЕ Руссланд Сервис». В штате имеются квалифицированные инженеры-проектировщики и сервисные инженеры.



**SAACKE GmbH**

Зюдвестштрассе 13. 28237  
Бремен, Германия,  
тел. +49 421 64 95 0  
факс. +49 421 64 95 224  
E-mail: info@saacke.de  
[www.saacke.de](http://www.saacke.de)

**SAACKE GmbH**

Представительство в РФ  
129164, Москва  
Ул. Ярославская, д. 8,  
корп. 6,  
оф. 12–12а  
Тел. +7 (495) 789-31-17  
Факс+7 (495) 682-31-91  
E-mail: info@saacke.de  
[www.saacke.ru](http://www.saacke.ru)

**ООО ЗААКЕ Руссланд Сервис**

Запчасти Наладка Сервис  
Тел. +7 (495) 789-36-05  
Факс +7 (495) 682-31-91  
E-mail: service@saacke.ru