

УДК 662.76

ЖЕЛЕЗНАЯ Т.А., ГЕЛЕТУХА Г.Г.

Институт технической теплофизики НАН Украины

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА ИЗ БИОМАССЫ БЫСТРЫМ ПИРОЛИЗОМ Обзор. Часть 2.

Розглянуто характеристики піропалива, отриманого з біомаси шляхом швидкого піролізу, та різні способи його застосування. Показано, що часто якість піропалива є недостатньою для його безпосереднього використання як палива. Застосовують різні технології підвищення якості, направлені на зменшення корозійних властивостей та в'язкості піролізної рідини. На даний час найбільших успіхів досягнуто у спалюванні піропалива у котлах. Є позитивний досвід по його використанню в газових турбінах та дизельних двигунах. Розпочато дослідження щодо застосування піропалива у двигуні Стірлінга. Проаналізовано капітальні затрати, що необхідні для спорудження піролізних установок.

Рассмотрены характеристики пиро-топлива, полученного из биомассы путем быстрого пиролиза, и различные способы его применения. Показано, что часто качество пиротоплива является недостаточным для непосредственного использования в качестве топлива. Применяются различные технологии повышения качества, направленные на уменьшение коррозионных свойств и снижение вязкости пиролизной жидкости. К настоящему времени наибольшие успехи достигнуты в сжигании пиротоплива в котлах. Имеется положительный опыт по его использованию в газовых турбинах и дизельных двигателях. Начаты исследования по применению пиротоплива в двигателе Стирлинга. Проанализированы капитальные затраты, необходимые для создания пиролизных установок.

Characteristics of bio oil obtained by fast pyrolysis are considered. The ways of pyrolysis oil application are analyzed. It is shown that often quality of pyrolysis oil is not enough for direct application as fuel. Different upgrading technologies are used. They are aimed to decrease corrosion activity and viscosity of pyrolysis liquid. Presently the most success is achieved in combustion of bio oil in boilers. There also exists some positive experience on application of pyrolysis oil in gas turbines and diesel engines. Investigation of the use of pyrolysis oil in Stirling engine was started. Capital costs of pyrolysis installations are analyzed.

КПД – коэффициент полезного действия

Q_n^p – низшая теплота сгорания

Индексы

t – тепловой

э – электрический

Настоящая статья является второй частью статьи [1], в которой были рассмотрены состояние и перспективы развития технологий быстрого пиролиза, а также характеристики различных технологий быстрого пиролиза биомассы. Здесь будут проанализированы вопросы применения пиротоплива (пиролизных масел) и капитальные затраты пиролизных установок.

На сегодняшний день имеется опыт использования пиротоплива в котлах, дизельных и газотурбинных двигателях. Начаты исследования по сжиганию пиролизных масел в двигателе Стирлинга. Области применения пиротоплива различ-

ны в разных странах. Например, в Швеции и Финляндии перспективным считается использование пиротоплива как заменителя котельного топлива, а в Дании, Италии, Финляндии и Великобритании – совместное производство теплоты и электроэнергии на дизельных электростанциях.

Характеристики пиротоплива

Жидкие продукты пиролиза представляет собой высокоокисленные углеводороды со значительным содержанием воды, как исходной, так и образовавшейся в результате реакции. Может

Табл. 1. Сравнение энергетических характеристик различных топлив [9]

Сырье	Объемная плотность, кг/м ³	Теплота сгорания, МДж/кг (сух. масс.)	Энергетическая плотность, ГДж/м ³
Солома	100	20	2
Древесная щепа	400	20	8
Углистое вещество	300	30	9
Пиротопливо	1200	23	28
Этанол	800	28	22
Дизельное топливо	800	45	36

Табл. 2. Сравнение характеристик пиротоплива и традиционных жидких топлив [12]

Параметры	Пиротопливо	Дизельное топливо	Мазут
Плотность (при 15 °С), кг/м ³	1220	850	960
Кинематическая вязкость (при 50 °С), сантистокс	13	2,5	351
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	17,5	42,9	40,7
Содержание золы, % (масс.)	0,13	< 0,01	0,03
Содержание воды, % (масс.)	20,5	0,1	0,1
Элементарный состав, %			
углерод	48,5	86,3	86,1
водород	6,4	12,8	11,8
кислород	42,5	0,9	0
сера	0	0,15...0,30	2,1

присутствовать также твердое углистое вещество. Пиротопливо имеет гораздо более высокую энергетическую плотность по сравнению с исходным сырьем, которая сравнима с энергетической плотностью, например, дизельного топлива. Однако его элементарный состав и вязкость существенно отличаются от традиционных жидких топлив, а теплота сгорания практически вдвое ниже (табл. 1, 2). Наличие большого количества воды затрудняет воспламенение пиротоплива. Кислоты могут вызвать коррозию материалов энергогенерирующего оборудования. При использовании пиротоплива необходимо уделять особое внимание таким элементам оборудования, как емкости для хранения, насосы, вентили, форсунки и т.п. Они должны быть изготовлены из специальных коррозионно-стойких материалов, например, полипропилена.

Ухудшение качества пиротоплива может произойти при температурах свыше 100 °С, которые неблагоприятным образом влияют на его физические свойства (увеличение вязкости, сепарация фаз, отложение битумоподобного осадка вследствие полимеризации). Для снижения вязкости пиротоплива в целях перекачки и распыления применяют предварительный нагрев, добавление воды, метанола или этанола. Соприкосновение с воздухом также вызывает ухудшение качества пиротоплива, но с меньшей скоростью, чем при росте температуры. Пиротопливо можно хранить в закрытой емкости с минимальным отверстием для избежания избыточного роста давления. По имеющимся данным, пиротопливо может таким образом храниться в хорошем состоянии до двух и более лет [2, 3].

Повышение качества пиротоплива

До настоящего времени не существует утвержденных национальных или международных стандартов на качество пиротоплива, полученного из биомассы. Одной из причин является отсутствие достаточного количества пиролизных масел, произведенных по различным технологиям быстрого пиролиза, для их сравнения и проведения долговременных экспериментов по использованию в качестве топлива. Тем не менее, ряд организаций, таких как Orenda Aerospace Corporation (Канада), VTT, Fortum Oil&Gas Oy (бывшая Neste Oy) (Финляндия) активно работают в этом направлении и определяют, какими характеристиками должно обладать пиротопливо для применения в котлах, дизельных двигателях, газовых турбинах.

Для оценки возможности использования пиролизных масел в качестве топлива наиболее важными являются следующие показатели: теплота сгорания, содержание твердых частиц, содержание воды, вязкость, стабильность, однородность, температура воспламенения. Качество пиротоплива, полученного быстрым пиролизом из биомассы, может быть недостаточным для его использования в коммерческих целях (в первую очередь, в двигателях). Поэтому применяются различные технологии повышения качества, которые можно разделить на физические и химические. Физические методы заключаются в фильтрации жидкости/паров для удаления углистого вещества, формировании эмульсий с углеводородами и добавлении растворителей. К химическим методам относят реакцию со спиртами, каталитическое дезоксигенирование (удаление кислорода), гидрогенизацию и каталитический (цеолитовый) крекинг в паровой фазе [4].

Фильтрация паров перед конденсацией является более эффективным методом удаления частиц углистого вещества по сравнению с фильтрацией жидкости. Горячая фильтрация паров выполняется с использованием спеченного металла, пористой керамики и гибких элементов из керамических волокон. Эти фильтры работают при температуре 400...420 °С, то есть в диапазоне температур, который является оптимальным для избежания конденсации паров и минимизации

потери жидкого продукта вследствие термического крекинга. При использовании горячей фильтрации выход жидкого продукта составляет 50...55%, то есть на 10% меньше, чем при использовании на той же установке циклонов. Однако содержание золы в пиротопливе после горячей фильтрации — менее 0,01%, а щелочных металлов — менее 10 млн⁻¹, что существенно лучше показателей пиротоплива без фильтрации. Чем ниже содержание твердых частиц, тем ниже вязкость пиролизной жидкости и тем меньше она густеет при хранении [5].

Полярные растворители (метанол, фурфураль и др.) применяются для гомогенизации пиролизных масел и снижения вязкости. Вязкость пиротоплива, содержащего 10% метанола, растет в 20 раз медленнее, чем без добавления метанола. Влияние растворителей на вязкость реализуется тремя механизмами: 1 — физическое растворение без воздействия на скорость химических реакций, 2 — снижение скорости реакций посредством молекулярного растворения или изменения микроструктуры пиротоплива, 3 — химические реакции между растворителем и компонентами пиротоплива. Использование растворителей является одним из самых простых и практических методов улучшения качества пиротоплива [5].

Основной характеристикой, ухудшающей качество пиротоплива, является высокое содержание кислорода — 25...40% (в мазуте — до 1%). Удаление кислорода из жидких продуктов пиролиза основывается либо на традиционной гидрогенизации, либо на развивающейся цеолитовой технологии [2]. Гидрогенизация — это присоединение водорода к химическим элементам или к соединениям обычно под влиянием катализаторов (рис. 1). Содержание кислорода в пиротопливе может быть уменьшено в значительной степени или полностью обработкой под высоким давлением в среде H₂, как это делается при переработке нефтепродуктов. Кислород удаляется в виде воды. Гидрогенизацию проводят в паровой или жидкой фазе, пропуская пары гидрируемого вещества вместе с водородом над катализатором или пропуская водород в гидрируемую жидкость, смешанную с катализатором. Обработка пиротоплива позволяет снизить содержание кислорода до 2.2-3.0% с применением в качестве катали-

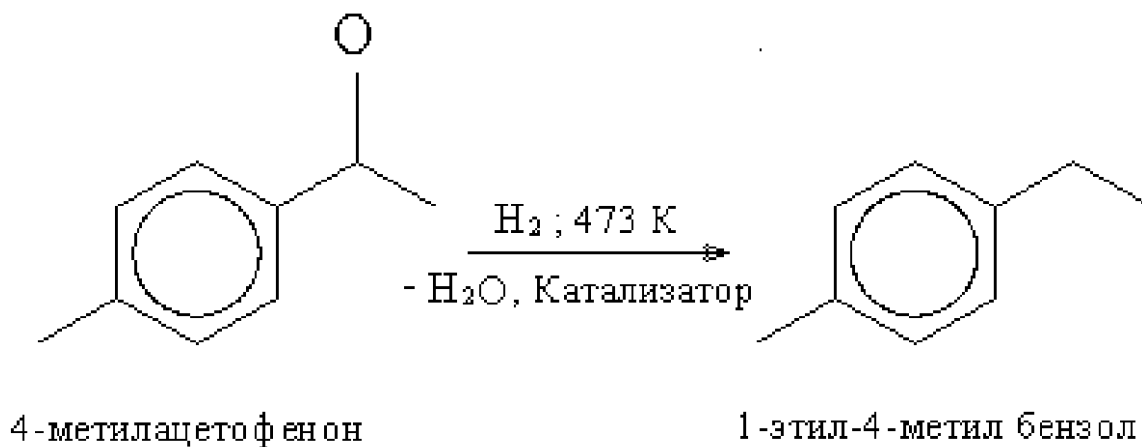


Рис. 1 Типичная реакция гидрогенизации кислородсодержащего соединения пиротоплива

затора тетралина и до 4,7% – без катализатора. Выход качественного топлива достигает 24% массы исходной сухой биомассы [6].

Цеолитовая технология, основанная на применении синтетического цеолита, широко распространена в спиртовом производстве. Цеолиты – это водные алюмосиликаты натрия и кальция. Для повышения качества пиротоплива используется цеолитовый крекинг пиролизных паров, в котором цеолит выступает в качестве катализатора. В этом случае кислород из пиротоплива удаляется в виде CO , CO_2 и H_2O . Цеолитовый крекинг рекомендуется проводить непосредственно при формировании паров пиролиза, то есть добавлять катализатор в пиролизный реактор. Это связано с тем, что, во-первых, сконденсированное пиротопливо в дальнейшем трудно перевести в паровую фазу и, во-вторых, при термическом воздействии пиротопливо может разложиться на другие химические соединения. По сравнению с гидрогенизацией, требующей расхода водорода, цеолитовая технология является более дешевой [7].

Качество пиротоплива с точки зрения снижения его кислотности может быть улучшено путем приготовления бинарных био-эмульсий. Эмульсии производятся из пиролизной жидкости и традиционного дизельного топлива. Одна из технологий предложена компанией CSGI (Италия) и состоит из двух стадий. На первой стадии из необработанной пиролизной жидкости путем фильтрации удаляются продукты, склонные к полимеризации, и высокомолекулярные соеди-

нения. Процесс проходит в вакууме в присутствии неорганических и органических адсорбентов. Жидкость освобождается от соединений, ответственных за ее спонтанную полимеризацию (в основном, муравьиной кислоты и связанных с ней промежуточных продуктов). Таким образом существенно снижается коррозионная активность пиротоплива, вызванная высокой кислотностью. На второй стадии непосредственно формируют эмульсию из пиротоплива и традиционного дизельного топлива. Био-эмульсия по сравнению с необработанной пиролизной жидкостью имеет меньшую вязкость, меньшее поверхностное натяжение, меньшую коррозионную активность, а также более высокую теплоту сгорания и цетановое число. Положительной чертой описанной технологии является сравнительная дешевизна и возможность интегрирования в пиролизную установку.

Вопросом создания эмульсий из RTP-пиротоплива и дизельного топлива и изучением области их применения занимается также Ensyn Group Inc (Канада). Исследования, выполненные этой компанией в сотрудничестве с Petro-Canada (Канада), VTT Energy, Neste Oy (Финляндия) и Ormrod Diesel (Великобритания), показали, что эмульсии из пиротоплива и дизельного топлива могут применяться в котлах и дизельных двигателях. В CANMET Energy Technology Centre (Канада) разработана технология создания стабильных микроэмульсий, состоящих на 5...30% из пиролизных масел и дизельного топлива. По сравнению с обычным

пиротопливом эти эмульсии являются менее коррозионноактивными и лучше воспламеняются, однако технология их производства требует больших затрат энергии. В эмульсиях, разработанных в университете Florence, концентрация пиротоплива в дизтопливе составляет от 10 до 90% [8].

Ни одна из технологий повышения качества пиротоплива не является пока коммерчески пригодной, не получены надежные данные по балансу массы в рассматриваемых процессах и по эксплуатации установок, основанных на описанных технологиях [2, 9]. Однако активность, с которой ведутся работы в этой области, и полученные на сегодня результаты свидетельствуют о том, что это вопрос времени, и технологии улучшения качества достигнут коммерческого уровня.

Использование пиротоплива в котлах

Вопросом применения пиротоплива в котлах занимается ряд организаций в Европе, США и Канаде. Несмотря на ряд очевидных трудностей по сравнению со сжиганием традиционного топлива (низкая теплота сгорания, большое содержание воды, кислотность), использование пиротоплива как заменителя легкого котельного топлива считается одним из наиболее перспективных способов его утилизации. Во многом это связано с высокой стоимостью нефтепродуктов и постоянной тенденцией к ее увеличению. Работы в этой области ведутся в двух направлениях. С одной стороны, системы сжигания адаптируются к пиролизным маслам (установка специальных горелок на существующих котлах), что позволяет избежать дорогостоящей процедуры повышения качества топлива. С другой стороны, совершенствуют саму технологию быстрого пиролиза с целью получения более качественного жидкого продукта.

Финская компания Fortum Oy, работая над вопросом использования пиротоплива как заменителя котельного топлива для котлов мощностью 0,1...10 МВт, выполнила модификацию существующей системы сжигания топлива. Проведены испытания по сжиганию пиротоплива, полученного из древесной биомассы, в котле Danstoker мощностью 2,5 МВт. Котел имел горелку, пред-

назначенную для сжигания, как мазута, так и пиролизных масел. Тесты проводились на чистом пиротопливе и на смесях пиротоплива с топочным мазутом в различных пропорциях. Котел продемонстрировал удовлетворительную работу на смесях топлива, и было установлено, что для достижения устойчивого горения при использовании только пиролизных масел, необходимы незначительные модификации [8, 10, 11].

В 2003–2005 гг. ряд организаций под руководством VTT (Финляндия) в рамках проекта COMBIO, финансируемого Европейской Комиссией, выполнили широкомасштабное исследование по сжиганию пиротоплива в котлах мощностью 0,05...10 МВт. Пиротопливо производилось на пилотной установке производительностью 500 кг древесины/ч, работающей по технологии Forestera™. Типичные характеристики полученного жидкого продукта представлены в табл. 3. Критериями качества считалось содержание твердых частиц на уровне <0,05% масс. и воды – 23...25% масс. Для улучшения качества пиротоплива использовалось приготовление эмульсий (10% пиролизной жидкости + 90% легкого котельного топлива) и горячая фильтрация в паровой фазе. Тесты по сжиганию пиротоплива проводились на котле компании Fortum Oy мощностью до 1 МВт и на тепловой станции Arsta с котлом 9 МВт (Стокгольм). На бытовом котле 50 кВт, спроектированном и построенном компанией CSGI (Италия), исследовалось сжигание пиротоплива и эмульсий [12].

Котел Fortum имеет горелку специальной конструкции, разработанной Oilon Oy (Финляндия). Поскольку пиролизная жидкость содержит большое количество воды, ее теплотворная способность по сравнению с нефтепродуктами значительно ниже, и дутьевого воздуха при горении требуется примерно в 2 раза меньше. Это было учтено Oilon Oy при модификации головки горелки котла Fortum. Существенных технических проблем при сжигании пиротоплива не возникло, результаты экспериментов оказались вполне удовлетворительными. Эмиссия загрязняющих веществ (кроме пыли) была достаточно низкой, практически как при сжигании легких нефтепродуктов. Содержание CO в продуктах сгорания составляло 30 ppm (млн⁻¹), O₂ – 4,5%. Установлено,

Табл. 3. Характеристики пиротоплива, полученного по технологии Forestera™ [12]

Параметры	Типичное значение
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	15
Низшая теплота сгорания, МДж/л	19
Вязкость, сантистокс	
при 0 °С	500
при 30 °С	20
при 50 °С	10
при 80 °С	4
Температура воспламенения, °С	45...65
Содержание воды, % масс.	23...28
Содержание твердых частиц (исходное), % масс.	<0,1
Содержание твердых частиц (после дополнительной обработки) % масс.	<0,05
Плотность, кг/л	1,2

что содержание твердых частиц обязательно должно быть ниже 0.05% масс., в противном случае происходит эрозия элементов оборудования и требуется замена форсунок через каждые 1000 л использованного пиротоплива.

Котел тепловой станции Arsta также оборудован горелкой, которая спроектирована под сжигание пиролизных масел и представляет собой вращающийся конус (5000 об/мин), что приводит к распылению подаваемого топлива. Это особенно важно при совместном сжигании различных топлив, поскольку способствует их хорошему перемешиванию. Для запуска котла на пиротопливе потребовалось применение подсветки. В данном случае были использованы жирные кислоты, однако наряду с ними может применяться смоляное масло или тяжелое дизельное топливо. Котел запускался полностью на подсветке, затем начинала подаваться смесь жирных кислот и пиротоплива с постепенным увеличением доли последнего. Подсветка также применялась, если процесс горения становился нестабильным. Результаты измерения состава дымовых газов представлены в табл. 4.

Результаты экспериментов, выполненных на котле CSGI 50 кВт показали, что для избежания коррозии при перекачке пиротоплива требуется

насос из нержавеющей стали. Поскольку такой вариант является очень дорогостоящим, была разработана специальная технология “Niploy process” для нанесения никелевого покрытия толщиной 50 микрон на элементы обычного насоса. Такое покрытие делает поверхность стойкой к коррозии, истиранию, тепловому удару (от +200 °С до –192 °С) и снижает коэффициент трения.

Крупномасштабные испытания по совместному сжиганию пиротоплива и угля были проведены на тепловой электростанции Manitowac (Wisconsin, США). Пиротопливо, полученное по RTP-технологии быстрого пиролиза, использовалось для коммерческого производства электроэнергии. За месяц было наработано 370 часов совместного сжигания топлив и обеспечено 5% подвода теплоты для котла 20 МВт. Не было зафиксировано никакого негативного влияния на работу котла по сравнению с его функционированием в обычном режиме (на угле) [8].

Изучением и совершенствованием технологий повышения качества пиротоплива и его сжиганием в котлах занимаются также компании ENEL Produzione (Италия), CANMET (Канада), MIT (США) и другие.

В настоящее время единственной коммерческой установкой, регулярно использующей пиро-

Табл. 4. Состав дымовых газов при сжигании пиротоплива в котле тепловой станции Arsta (Стокгольм)

Параметр	Среднее значение
O ₂ , % объемн.	4,5
CO ₂ , % объемн. (по расчету)	12,7
CO, млн ⁻¹	13
Пыль, мг/нм ³	158
Пыль, мг/МДж	68
NO _x , млн ⁻¹	71
SO _x , млн ⁻¹	<2
Удельный расход газов, нм ³ /МДж топлива (по расчету)	0,43

топливо для выработки тепловой энергии, является котел компании Red Arrow Products (Wisconsin, США). Котел мощностью 5 МВт с вихревой горелкой расположен на пиролизной станции, работающей по RTP-технологии быстрого пиролиза. Он использует в качестве топлива не только нерастворимую в воде фракцию пиролизных масел (пиролитический лигнин), но и углистое вещество и пиролизный газ. Пиротопливо подается в зону горения через форсунку из нержавеющей стали и распыляется для перемешивания с воздухом; углистое вещество и пиролизный газ подаются по другим топливным системам. Пиролизная станция и котел успешно работают уже более десяти лет (с 1993 г.). Выполненные в 1994 г. замеры по эмиссии из котла показали, что эмиссия CO составляет 17%, NO_x – 1,2%, формальдегида – 0,2% от допустимого уровня [8].

Использование пиротоплива в дизельных двигателях

Утилизация пиротоплива в дизельных двигателях с целью выработки электроэнергии является достаточно перспективным направлением, но еще далеким от широкого коммерческого применения. Для возможности использования в двига-

теле к качеству пиротоплива предъявляются более жесткие требования, чем для сжигания в котле. Основные проблемы связаны с высоким содержанием золы в пиротопливе, высокой вязкостью и низким рН. Наиболее активно проблемой использования пиротоплива в дизельных двигателях занимаются Ormrod Diesel (Великобритания) и Wartsila Diesel Oy (Финляндия) (табл. 5) [13].

Еще первые испытания по сжиганию пиротоплива в одном цилиндре двигателя V32, выполненные Wartsila Diesel Oy в 1993 г. показали, что КПД работы двигателя составляет 44,9% (по Q_н^p), а эмиссия NO_x и CO ниже, чем при работе на традиционном топливе, хотя общая эмиссия углеводородов немного выше. Wartsila Diesel Oy создала дизельную электростанцию мощностью 1,5 МВт_э для работы на пиротопливе, испытания и доработка которой проходили в VTT. Результаты позволили сделать вывод, что при наращивании мощности двигателя не предвидится существенных проблем, вплоть до 15 МВт_э. [11, 14]. Дополнительная информация по указанным исследованиям приведена в [15].

По результатам проведенных испытаний Wartsila разработала требования к качеству пиролизных масел, которым они должны удовлетворять для использования в дизельном двигателе. Аналогичные требования применительно к котлам установила компания Stockholm Energi AB (Швеция) – потенциальный потребитель пиротоплива для сжигания в котлах (табл. 6) [5, 16].

Компания Ormrod Diesel выполнила успешные тестовые испытания по сжиганию пиротоплива в модифицированном двухтактном дизельном двигателе мощностью 250 кВт_э. Три цилиндра из шести были адаптированы под сжигание пиролизных масел с использованием до 5% дизтоплива в качестве пилотного (подсветки) для инициации процесса горения (три других цилиндра на период экспериментов были закрыты). В двигателе использовалось пиротопливо без какой-либо предварительной обработки, всего было наработано более 400 часов. Замеры эмиссии показали, что кроме выбросов CO все остальные показатели ниже таковых при работе двигателя на дизтопливе [8, 17].

Исследования, проведенные VTT Energy (Финляндия) на двигателях мощностью 4,8 кВт и

Табл. 5. Организации, занимающиеся испытанием двигателей на пиротопливе

Название	Вид двигателя	Мощность, кВт _э
Orenda Aerospace Corporation, Канада	Газотурбинный двигатель	2500
Wartsila Diesel, Финляндия	Дизельный двигатель	1500
Ormrod Diesel, Великобритания	Дизельный двигатель	250
VTG Energy, Финляндия	Дизельный двигатель	84 и 4,8
Университет Rostock, Германия	Газотурбинный двигатель	75

Табл. 6. Требования к качеству пиротоплива [5]

Параметры	Wartsila Diesel Oy сжигание в дизельном двигателе	Stockholm Energi AB сжигание в котле
Гомогенность	Хранение в течение 7 дней без сепарации фаз	
Содержание воды, % масс.	макс. 26	макс. 25
Высшая теплота сгорания, МДж/кг	мин. 18	мин. 19
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	мин. 16	мин. 17
Содержание золы, % масс.	макс. 0,1	макс. 0,1
Содержание твердых частиц, общее, % масс. <50 микрон <25 микрон	макс. 1 100% мин. 90%	макс. 1 мин. 90%

84 кВт показали, что они могут эффективно работать на пиролизных маслах, но для зажигания необходимо обязательно применять пилотное топливо. При этом эмиссия CO, NO_x и углеводородов находится примерно на том же уровне, что и при работе на обычном дизтопливе. Другими организациями, которые имеют опыт использования пиротоплива в дизельных двигателях, являются CNR Institut Motori (Италия), университет Kansas (США), MIT (США), BTG (Нидерланды). Применение эмульсий с дизельным топливом в небольших двигателях изучают Pasquali Macchine Agricole (Италия) и университет Kassel (Германия). Обобщение опыта этих организаций, накопленного к настоящему времени, показывает, что устойчивая и длительная работа дизельного двигателя на пиролизных маслах возможна только при условии выполнения довольно существенных модификаций элементов двигателя и применения коррозионностойких материалов. В случае использования эмульсий с дизельным

топливом значительных модификаций не требуется, однако должны быть предприняты определенные меры против коррозии поверхностей двигателя [8, 13].

Использование пиротоплива в газотурбинных двигателях

Первые эксперименты по использованию пиролизной жидкости в газовых турбинах были выполнены Teledyne CAE (США) в начале 1980-х годов. Пиротопливо, полученное медленным пиролизом из лесных и сельскохозяйственных отходов, сжигалось на экспериментальном стенде с газовой турбиной J69-T-29. Используемое жидкое топливо по своим свойствам было близко к пиротопливу, получаемому быстрым пиролизом, но имело большее содержание углерода и более высокую вязкость. Результаты экспериментов показали, что эмиссия CO выше, чем при сжигании традиционных легких топлив, а эмиссия СН

и NO_x на том же уровне. Проблемой было зашлаковывание выхлопной секции двигателя золой, содержащейся в пиротопливе [8].

Orenda Aerospace Corporation (Канада) в 1995 г. начала широкомасштабные работы по утилизации пиротоплива в газовых турбинах с целью выработки электроэнергии и является в настоящее время наиболее активной компанией в этой области. Orenda в сотрудничестве с Ensyn Group Inc. и НПО Машпроект (Украина) модернизировала газотурбинный двигатель ГТ 2500 (мощность на валу 2,85 МВт_э) для работы на пиротопливе, и представляет его для использования в промышленных масштабах. Основные модификации коснулись топливной форсунки — она была приспособлена к работе на вязком топливе с низкой теплотой сгорания. Для предотвращения повреждения элементов высокотемпературной секции были применены защитные покрытия. Кроме того, была создана топливная система для двух видов топлива, с тем, чтобы двигатель мог стартовать на дизельном топливе и затем перейти на пиролизные масла. Пиротопливо для двигателя производится по RTP-технологии компании Ensyn. Перед подачей в камеру сгорания газотурбинного двигателя пиротопливо проходит через систему подготовки и предварительного подогрева. Горение пиротоплива происходит в двух выносных камерах сгорания цилиндрического типа, имеющих воспламенители. В состав двигателя входит также компрессор, состоящий из девяти осевых ступеней и одной центробежной (степень сжатия 12:1) и трехступенчатая осевая турбина. Частота вращения ротора — 14 тыс. об/мин. На валу двигателя установлен планетарный редуктор, соединенный с электрогенератором. Расход топлива составляет 15 кг/с, КПД — 28,5%. Газотурбинный двигатель соответствует стандарту качества ISO 2314 [13].

В 2003 г. Orenda Aerospace Corporation провела длительные тесты по сжиганию в турбине трех видов пиротоплива от различных крупных производителей. Было использовано более 13 тыс. л в газотурбинном двигателе и 8 тыс. л на испытательном стенде. Результаты экспериментов продемонстрировали техническую возможность использования пиролизных масел в качестве топлива для газовых турбин. Было установлено,

что эмиссия NO_x составляет около половины от уровня эмиссии при сжигании дизельного топлива, а выбросы SO_2 практически отсутствуют. Эмиссия CO и твердых частиц чуть выше по сравнению с дизельным топливом. Были разработаны требования к качеству пиротоплива, согласно которым определяется его пригодность для применения в турбине.

В университете Rostock (Германия) выполнены испытания по сжиганию пиротоплива в небольшой коммерческой газовой турбине T216 номинальной мощностью 75 кВт_э. Камера сгорания турбины была модифицирована и оборудована двумя отдельными топливными системами для возможности работы на пиротопливе и дизтопливе. По сравнению с дизтопливом эмиссия CO и CH была значительно выше, а эмиссия NO_x — ниже. Были зафиксированы отложения в камере сгорания и на лопатках. Компания ENEL (Италия) на стационарном испытательном стенде также провела исследования по сжиганию пиротоплива в газовой турбине. В целом можно сделать вывод о технической возможности и целесообразности использования пиротоплива в газотурбинных двигателях. Однако для этого необходимы определенные модификации двигателя, например, такие, которые выполнила Orenda Aerospace Corporation на ГТ 2500 [8, 13, 17].

Использование пиротоплива в двигателях Стирлинга

В последнее время стал изучаться вопрос о возможности использования пиротоплива в двигателе Стирлинга. Организация ZSW (Германия) провела эксперименты по сжиганию пиролизных масел на когенерационной установке с двигателем Стирлинга мощностью 25 кВт. Установка оборудована модифицированной горелкой FLOX (беспламенное окисление), которая включает воздушную форсунку. Эксперименты продемонстрировали техническую возможность сжигания пиротоплива в двигателе, при этом эмиссия загрязняющих веществ не превышала установленные в Германии нормы. Однако тепловой и электрический КПД установки был невысоким (в сумме 50...60%). Возможно, это было связано с геометрией камеры сгорания и отсутствием

предварительного подогрева воздуха перед распылением [8].

Анализ капитальных затрат на пиролизные установки

Удельные капитальные затраты на строительство пиролизных установок существенно зависят от двух факторов – так называемого “эффекта изучения” и мощности установки. Эффект изучения представляет собой экономию различных затрат при сооружении 10-й и далее установок, связанную с накоплением определенного опыта в этой области и с совершенствованием технологии. Чем новее технология, тем сильнее эффект изучения. Например, расчеты, проведенные для установки быстрого пиролиза с реактором с двумя шнеками (Исследовательский центр Karlsruhe, Германия), показали, что учет эффекта изучения может снизить удельные капитальные затраты на 22...45%. Расчеты выполнены для случая установки мощностью 50 МВт, работающей 7000 ч/год на соломе, с использованием трех различных методик оценки капитальных затрат [18] (табл. 7).

Удельные капитальные затраты нелинейно уменьшаются с ростом мощности установки. По данным [19] удельные капитальные затраты на установку быстрого пиролиза снижаются от 1150 \$/кВт_т при мощности около 10 МВт_т (по жидкому продукту) до 250 \$/кВт_т при мощности 140 МВт_т. Нарушение общей закономерности наблюдается в диапазоне мощности 40...60 МВт_т (по жидкому продукту). По-видимому, это связано с использованием авторами этих данных различных методик определения удельных капитальных затрат.

Состояние и перспективы развития технологий быстрого пиролиза биомассы в Украине

В настоящее время технологии медленного пиролиза биомассы используются в Украине, в основном, для производства древесного угля в технологических целях металлургической и фармацевтической промышленности, а также для очистки загрязненных вод и газов. Используются, как правило, установки камерного типа (процесс карбонизации и медленного пиролиза), а в

качестве сырья применяется древесина твердых пород. Лесохимические комбинаты, которые производят древесный уголь, расположены, в основном, в Закарпатском регионе Украины.

Технология быстрого пиролиза биомассы практически неизвестна в Украине, отсутствуют как исследовательские, так и демонстрационные установки. В Институте технической теплофизики НАН Украины разработана технология быстрого пиролиза в абляционном шнековом реакторе, и есть планы по ее реализации на пилотной установке.

Отходы сельскохозяйственного производства (солома, стебли и початки кукурузы, стебли и лузга подсолнуха и другие отходы) составляют основу потенциала биомассы в Украине [20], обладая при этом низким показателем объемной энергетической плотности (порядка 2...4 ГДж/м³) и, соответственно, высокими затратами на транспортировку к установке термохимической конверсии. В этой связи, особой перспективой в Украине обладают передвижные (мобильные) установки быстрого пиролиза для производства жидкого топлива, которое имеет объемную энергетическую плотность порядка 28 ГДж/м³. При этом к месту расположения энергоустановки доставляется не биомасса, а произведенное из нее пиротопливо, что значительно снижает транспортные расходы. Быстрый пиролиз отходов сельскохозяйственного производства является практически единственно возможной технологией для использования в передвижных установках, поскольку технологии прямого сжигания и газификации не имеют потребителя на произведенную теплоту и генераторный газ непосредственно в местах сбора/выращивания биомассы. Использование мобильных установок позволит также значительно снизить себестоимость энергии, произведенной из биомассы, поскольку отсутствуют капитальные и эксплуатационные затраты на брикетирование, хранение и сушку биомассы. Так, избыток соломы, доступный для получения энергии, может быть переработан в жидкое топливо в течение летне-осеннего периода, причем в дни, когда влажность соломы минимальна.

Для использования в составе мобильной установки наиболее оптимальной представляется технология абляционного пиролиза, как ввиду

Табл. 7. Оценка капитальных затрат для установки быстрого пиролиза мощностью 50 МВт [18]

Статьи затрат	1-я установка	10-я установка
Система подготовки топлива ¹⁾ , тыс. евро		
- доставка	120	120
- хранение ²⁾	3000	3000
- измельчение ³⁾	300	300
- промежуточное хранение ⁴⁾	150	150
- погрузка/разгрузка ⁵⁾	530	530
Пиролизная установка (система подачи топлива, реактор, система охлаждения, система промежуточного хранения пироотоплива и углистого вещества), тыс. евро:		
- по данным Weiss [18]	20	14,1 ⁶⁾
- по данным Bridgwater [21]	13,3	9,4 ⁶⁾
- по данным Solantausta [22]	27,4	13,1
Перемешивающее устройство для пиролизной жидкости (9 т/ч), тыс. евро	50	50
Цистерна для хранения пиролизной жидкости, тыс. евро	50	50
Всего капитальные затраты, млн евро:		
- по данным Weiss [18]	24,2	18,3 ⁶⁾
- по данным Bridgwater [21]	17,5	13,6 ⁶⁾
- по данным Solantausta [22]	31,6	17,3
Удельные капитальные затраты, евро/кВт:		
- по данным Weiss [18]	484	366 ⁶⁾
- по данным Bridgwater [21]	350	272 ⁶⁾
- по данным Solantausta [22]	632	346

1) Топливо – солома пшеницы влажностью 14%, теплота сгорания 4 МВт · ч/т. Расход соломы 12,4 т/ч (86800 т/год).

2) Объем хранилища для тюкованной соломы плотностью 120 кг/м³ – 24 тыс. м³, стоимость 125 евро/м³. Срок хранения 4 дня.

3) Измельчение выполняется шредером (50 тыс. евро), соломорезкой (50 тыс. евро), молотковой дробилкой (200 тыс. евро).

4) Объем хранилища для измельченной соломы плотностью 80 кг/м³ – 625 м³ (два бункера по 75 тыс. евро). Срок хранения 4 часа.

5) Три крана (160 тыс. евро каждый), два конвейера (25 тыс. евро каждый).

6) По оценке авторов [18].

большей удельной производительности, простоты и надежности, так и ввиду меньшей удельной стоимости по сравнению с установками кипящего слоя. Таким образом, наиболее перспективными для Украины представляются технологии абляционного пиролиза для использования в составе передвижных установок (производитель-

ностью 50...200 кг сырья/ час) и технологии быстрого пиролиза в двух реакторах кипящего слоя для использования в составе стационарных установок (производительностью 1...5 т сырья/час).

Материалы статьи подготовлены в рамках работы над проектом УНТЦ № 3036.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гелетуха Г.Г., Железная Т.А.* Получение жидкого топлива из биомассы быстрым пиролизом и его использование. Часть 1 // Промышленная теплотехника. – 2005. – N 4, с. 91–100.
2. *Bridgwater A.V.* Biomass Pyrolysis Technologies. Proc. of the 5th European Bioenergy Conference. Lisbon, Portugal, 9–13 October 1989. – Elsevier, 1989. – Vol.2, pp. 489–496.
3. *Bridgwater A.V., Peacocke G.V.C.* Fast pyrolysis for biomass // Renewable and Sustainable Energy Reviews, N 4, 2000, pp. 1–73.
4. *Czernik S.* Review of Fast Pyrolysis of Biomass. Presentation at Mississippi Bioenergy Thermochemical technologies Roundtable, Jackson, MS, January 28, 2004.
5. *Oasmaa A., Czernik S.* Fuel oil quality of biomass pyrolysis oils – state of the art for the end users // Energy & Fuels, 13, 1999, pp. 914–921.
6. *Churin E., Grange P., Delmon B.* Catalytic Upgrading of Pyrolysis Oils. Proc. of the 5th European Bioenergy Conference. Lisbon, Portugal, 9–13 October 1989. – Elsevier, 1989. – Vol. 2, pp. 616–620.
7. *Williams P.T., Nugranad N.* Aromatic Hydrocarbons in the Catalytic Upgrading of Biomass Pyrolysis Oils in the Presence of Stem. Proc. of the 10th European Bioenergy Conference. Wurzburg, Germany, 8–11 June 1998. – CARMEN, 1998. – pp. 1589–1592.
8. *Czernik S., Bridgwater A.V.* Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil // Energy & Fuels, 18 (2), 2004, pp. 590–598.
9. *Bridgwater A.V.* Current and future prospects for biomass and bioenergy. Presentation at Int. workshop “Future Technologies for a Sustainable Electricity System”, 6–7 November 2003.
10. *Steven Gust.* Flash Pyrolysis Oil as Light Fuel Oil Replacement // Bioenergia, N2, 1996, pp. 34–35.
11. *Kai Sipila.* Thermochemical Conversion of Biomass // Bioenergia, N2, 1996, pp. 32–33.
12. *Vivarelli S., Tondi G.* Pyrolysis Oil: an innovative liquid biofuel for heating. The COMBIO Project. Presentation at Int. Workshop “Bioenergy for a sustainable development”, Casino Vina del Mar – Chile, 8–9 November 2004.
13. *Chiaramonti, Tondi G.* Stationary applications of liquid biofuels. Final Report on PTA contract NNE5-PTA-2002-006, lot 36.
14. *Ahnger A., Graham R.G.* Liquid Biofuel for Diesel Power Production: a Techno-Economic Assessment. Proc. of the 9th European Bioenergy Conference. Copenhagen, Denmark, 24–27 June 1996. – Pergamon, 1996. – Vol. 3, pp. 1614–1619.
15. *Гелетуха Г.Г., Железная Т.А.* Обзор современных технологий получения жидкого топлива из биомассы быстрым пиролизом. Часть 2. // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2000. – N 3, с. 3–11.
16. *Bridgwater A.V.* Biomass Pyrolysis System Design. Proc. of the 8th European Bioenergy Conference. Vienna, Austria, 3–5 October 1994, vol. 2, pp. 1591–1602.
17. *Bridgwater A.V.* The Status of Fast Pyrolysis of Biomass in Europe. Proc. of the 10th European Bioenergy Conference. Wurzburg, Germany, 8–11 June 1998. – CARMEN, 1998. – pp. 268–271.
18. *Lange S., Reimert R., Leible L. et al.* Fast pyrolysis of straw: assessment of the investments of the first commercial plants. Proc. of the Second World Biomass Conference. Rome, Italy, 10–14 May 2004. – ETA-Florence and WIP-Munich, 2004, pp. 997–999.
19. *Solantausta Y., Gust S., Baglioni P. et al.* Low boiler emissions with a cost competitive liquid biofuel. Proc. of Second World Biomass Conference, Rome, Italy, 10–15 May 2004, vol. 1, pp. 1086–1089.
20. *Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Тишаев С.В., Кобзарь С.Г.* Развитие биоэнергетических технологий в Украине // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2002. – N 3, с. 3–11.
21. *Bridgwater A.V., Toft A.J., Brammer J.G.* A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification // Renewable and Sustainable Energy Review, N6, 2002, pp. 181–248.
22. *Solantausta Y., Bridgwater T., Beckman D.* Electricity Production by Advanced Biomass Power Systems. VTT report 1729, 1996 ().

Получено 25.03.2005 г.