ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА, 2025, № 10, с. 43–51

ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО, ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ В ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ В ПРИСУТСТВИИ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА

© 2025 г. И. А. Шарина[a], *, Е. П. Копьев[a], Л. Н. Перепечко[a]

[a]Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, просп. Академика Лаврентьева, д. 1, г. Новосибирск, 630090 Россия

**e-mail: sharina@itp.nsc.ru*

Поступила в редакцию 27.02.2025 г.
После доработки 21.05.2025 г.
Принята к публикации 04.06.2025 г.

Приведены результаты анализа прикладных и фундаментальных исследований, выполняемых ведущими мировыми университетами и компаниями, горелочных устройств, предназначенных для сжигания жидких углеводородных топлив в присутствии перегретого водяного пара, применяемых в теплоэнергетике, в том числе разработанных с учетом патентной информации. Определены направления повышения эффективности работы горелочных устройств, их основные разработчики и производители. На рынке жидкотопливных горелочных устройств, применяемых в теплоэнергетике, имеются универсальные горелки, предназначенные для сжигания разного топлива, в том числе и некондиционного. Такие горелки сложны в обслуживании, их работа сопровождается сильным шумом и выбросами в атмосферу вредных веществ. Несмотря на существенные недостатки предлагаемых на рынке жидкотопливных горелок, паровые горелки не внедряются в промышленность, оставаясь на стадии опытно-промышленных образцов. Совершенствование горелочных устройств направлено на решение таких задач, как энергосбережение, уменьшение выбросов вредных веществ, простота устройств и их универсальность по виду и качеству сжигаемого топлива. Проводят исследования и активно оформляют патенты на горелочные устройства компании США, Японии, Китая, Республики Корея и России, причем Институт теплофизики (ИТ) СО РАН входит в список 10 первых патентообладателей. Паровые горелки патентуют для использования в 25 областях техники, преимущественно в области “тепловые процессы и аппараты”. Причем патенты на горелочные устройства и их элементы компании-патентообладатели практически не продают и не предоставляют лицензии на их применение, а используют в собственном производстве. Проведенная авторами работа позволяет определить уровень сторонних технологий в сравнении с технологиями ИТ СО РАН и выработать рекомендации для дальнейших исследований на основе патентной, научной и другой опубликованной информации.

Ключевые слова: горелочное устройство, жидкое углеводородное топливо, некондиционное топливо, перегретый водяной пар, паровая газификация, теплоэнергетика, энергоэффективность

DOI: 10.56304/S004036362560017X

Практический интерес к технологии сжигания жидких углеводородных топлив в присутствии перегретого водяного пара появился в связи с требованиями утилизации большого объема накопленных на предприятиях теплоэнергетики и других отраслей жидких углеводородных отходов (отработанных масел и смазочных жидкостей, некондиционных остатков топлив, шламов нефтепродуктов и др.), которые не находят масштабного практического применения, являются техногенными загрязнителями и представляют значительную опасность для окружающей среды. К примеру, отработанное масло – одно из самых доступных топлив. Его цена меньше стоимости газа, а в профильной промышленности его просто отправляют на утилизацию [1]. Таким образом, накопленные в огромном количестве и не востребованные пока жидкие углеводородные отходы являются весьма перспективными для вовлечения их в производство энергии. Однако для эффективного использования такого рода энергоносителей для выработки энергии требуется создание новых технологий, характеризующихся топливной универсальностью, высокой энергоэффективностью и низкими выбросами вредных веществ в окружающую среду. Одна из перспективных технологий сжигания отходов при производстве энергии, предложенная в ИТ СО РАН, –

подача в зону горения перегретого водяного пара, которая имеет следующие преимущества:

генерация пара осуществляется за счет тепловыделения при сжигании отходов;

пар взаимодействует с топливом, при этом расщепляются сложные органические соединения, интенсифицируются процессы окисления;

при воздействии струи пара на каплю топлива обеспечивается мелкодисперсная атомизация;

снижается температура пламени вследствие разбавления горючей смеси более теплоемкой средой, тем самым сокращается образование термических оксидов азота и углерода.

Цель данной работы – изучение ситуации на рынке горелочных устройств, предназначенных для сжигания жидких углеводородных топлив в присутствии перегретого водяного пара и применяемых в теплоэнергетике, а также обзор прикладных и фундаментальных исследований в этой области для определения уровня технологий в сравнении с технологиями ИТ СО РАН и выработки рекомендаций для проведения дальнейших исследований.

РЕШЕНИЯ, ВНЕДРЕННЫЕ В ПРОИЗВОДСТВО

Применение горелочных устройств в настоящее время весьма разнообразно: от выработки тепла для отопления и/или горячего водоснабжения до использования их в технологических процессах, например при получении синтез-газа, при сжигании мусора, в теплогенераторах, котлах. При этом главные направления совершенствования горелочной техники следующие:

частотное регулирование, при котором достигается экономия электроэнергии [2];

снижение образования токсичных оксидов азота NO_x;

использование электронных аппаратов для управления процессом горения.

Проблему отопления решают с помощью широко представленных на рынке универсальных горелок, работающих на отработанном масле. При этом возможен переход с одного типа топлива на другой без замены и снятия форсуночного блока. Работа таких горелок основана на смешивании отфильтрованного и подогретого топлива с воздухом, распылении и поджиге смеси. В то же время крупные зарубежные производители горелок во избежание конкуренции широко патентуют свои решения либо держат изобретения в виде ноу-хау. Например, компания Weishaupt (Германия) использует технологию Multiflame (ноу-хау), которая обеспечивает полное и чистое сжигание жидкого топлива благодаря его распылению вокруг первичного пламени. Кроме высокой эффективности горения, такая схема позволяет снизить удельные выбросы NO_x до 120 мг/(кВт · ч).

В ассортименте компании Hamworthy Engineering (Великобритания) имеются различные горелки, защищенные примерно 300 патентами более чем в 10 странах, среди них – ротационные горелки типа AW, рассчитанные на сжигание большинства сортов нефтяного (в том числе высоковязкого) топлива. Особенность ротационных горелок – отсутствие механической или паромеханической форсунки в традиционном понимании. Высокая эффективность сжигания топлива (в том числе битумов, гудронов и остатков тяжелых минеральных масел) при их использовании обеспечивается путем качественной регулировки различных потоков топлива. Такие горелочные устройства имеют следующие недостатки:

их работа сопровождается сильным шумом;

в топливе не должно быть примесей антифриза, бензина и воды;

при сжигании топлива образуются вредные вещества;

обслуживание таких устройств связано с определенными сложностями.

Другим перспективным направлением совершенствования промышленного применения горелочных устройств является подача в них перегретого водяного пара. Главные элементы горелочного устройства для сжигания жидких углеводородных топлив в присутствии перегретого водяного пара – парогенератор, паровая форсунка, топливо- и воздухоподводы. Работа такой горелки основана на горении жидкого углеводородного топлива, диспергированного высокоскоростной паровоздушной струей.

В Институте теплофизики СО РАН исследования процесса горения жидких углеводородов в режиме паровой газификации выполняются с начала 2000-х годов. Результат исследований – создание соответствующей технологии [3–5]. При подаче в зону горения струи перегретого водяного пара горение жидких углеводородов резко интенсифицируется, обеспечивается устойчивое воспламенение при большом расходе и высокой степени выгорания топлива. В процессе газификации образуются промежуточные компоненты: CO, H_2, OH. Сажа в продуктах сгорания практически отсутствует. Паровое горелочное устройство такого типа может быть использовано в системах автономного отопления. Его применение позволяет перерабатывать широкий ряд топлив, в том числе отработанное масло (отработку), что свидетельствует о целесообразности сравнивать его с универсальными жидкотопливными горелочными устройствами (ЖГУ) мощностью до 100 кВт с одноступенчатым регулированием, представленными на рынке. Данная технология защищена в России более чем 15 патентами.

Характеристики универсальных жидкотопливных горелок малой мощности при кинематическом коэффициенте вязкости топлива (сорт Е) 3.0 мм^2/с

Горелка (производитель)	Мощность, кВт	Стоимость, тыс. руб.
EnergyLogic (США)	До 99	171–239
Smart Burner (Китай)	24–119	125–145
Master (Китай)	17–200	144–182
Euronord/EcoLogic(Китай)	16–118	82–164
Kroll (Германия)	14–100	134–208
Giersch (Германия)	30–100	160–245
Тепламос ЭКО (Россия)	43–120	86–106
IL-2SV (ООО “СибСтронг”, Россия)	40–80	125
РУСНИТ-50100 (ЗАО “РУСНИТ”, Россия)	20–100	34
Паровая горелка ИТ СО РАН (Россия)*	До 100	До 100

* Кинематический коэффициент вязкости топлива до 50 мм^2/с.

В настоящее время главными конкурентами ЖГУ являются газовые горелки. Однако если будут организованы система сбора отработанных масел и государственный надзор за их обязательной переработкой, то ЖГУ будут востребованы на рынке. Пока на российском рынке присутствуют либо иностранные горелки, либо российские, собранные частично из импортных комплектующих. Характеристики представленных на рынке универсальных ЖГУ малой мощности приведены в таблице.

Главные преимущества паровой горелки ИТ СО РАН в сравнении с имеющимися на рынке горелками следующие:

отсутствует неблагоприятное воздействие на окружающую среду;

содержание угарного газа в продуктах горения составляет 11.76 мг/м^3, оксидов азота – 37.8 мг/м^3, что почти в 10 и 6 раз соответственно ниже значений, предусмотренных технологическими нормативами [6], количество сажи в продуктах сгорания не превышает 35 мг/м^3 (при этом недожог топлива менее 0.1%);

обеспечивается возможность перерабатывать нерегламентируемое топливо, а также топливо с примесями;

не требуется фильтрация топлива;

горелка имеет простую конструкцию, так как не применяются электродвигатель, топливная форсунка с воспламеняющими смесь электродами, система фильтрации, регулятор вторичного воздуха;

не нужен насос высокого давления;

используется пар, генерируемый за счет тепла, выделяющегося при сжигании самого топлива;

высокая тепловая мощность;

не происходит закоксовывания поверхностей;

автономная работа;

компактная компоновка.

В то же время при изучении рынка авторы не обнаружили сведений о применении в промышленности горелочных устройств мощностью до 100 кВт, предназначенных для сжигания жидких углеводородных топлив в присутствии перегретого водяного пара, хотя уже с начала прошлого века были известны и запатентованы паромазутные установки.

Таким образом, несмотря на существенные недостатки предлагаемого на рынке широкого ассортимента жидкотопливных горелок, в том числе работающих на отработке, особенно в части их экологической безопасности (сажевое число промышленно применяемых горелок по шкале Бахараха составляет 4–6, причем по экологическим нормативам и принятой классификации 1 считается идеально, 2 – нормально, 3 – плохо), паровые горелки не внедряются в промышленность и остаются на стадии опытно-промышленных образцов.

ИСТОРИЧЕСКАЯ РЕТРОСПЕКТИВА

Водяной пар широко используется при переработке углеводородов. В частности, при сжижении угля и производстве синтетического топлива с начала XX в. применяется процесс Бергиуса – прямое сжижение угля как способ превращения лигнита в синтетическое масло, запатентованный в 1913 г. Развитие этой технологии зависело от политической и экономической ситуаций: сжижение угля стало неотъемлемой частью немецкой промышленности в середине 1930-х годов. В Южно-Африканском Союзе была разработана технология сжижения угля в 1950-х годах из-за отсутствия собственных запасов нефти. В течение многих лет синтетическое топливо было основным продуктом технологии, и этот бизнес пользовался значительной государственной поддержкой за вклад в энергетическую безопасность страны.

На рис. 1 показана динамика патентования горелочных устройств – хорошо видны два пика

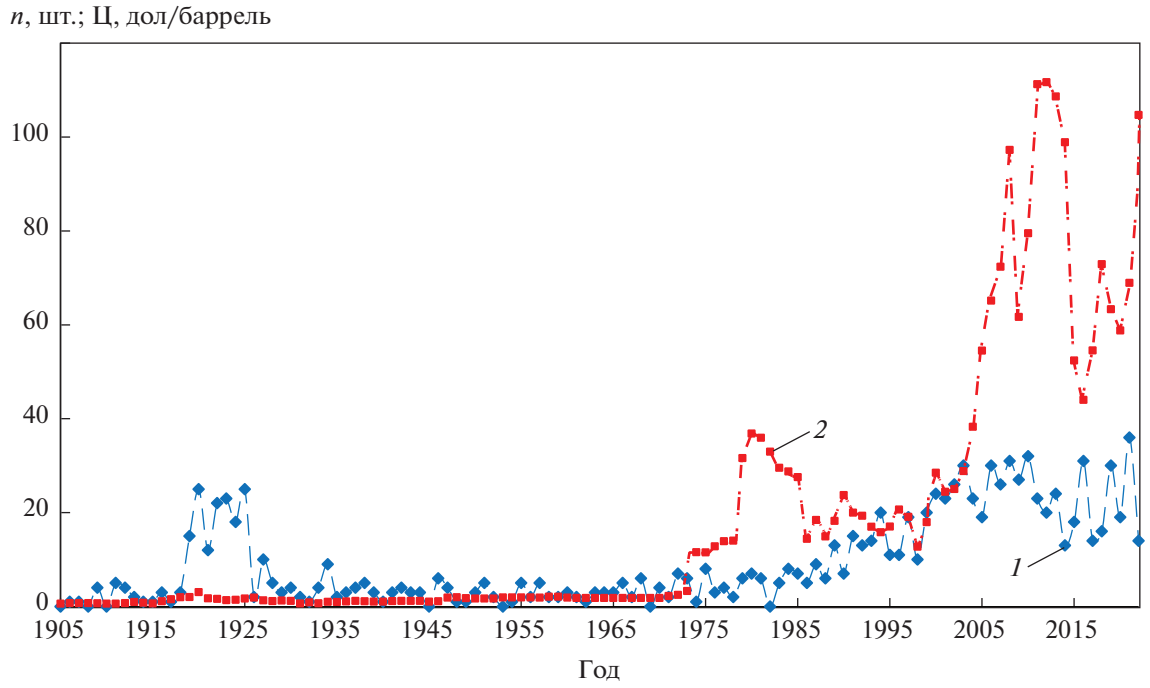


Рис. 1. Число патентов *n* (*1*) и средние цены Ц на нефть марки Brent (*2*) в 1905–2022 гг. [по данным Questel https://www.orbit.com/. (© Questel) и независимого агентства EIA (США) https://investfunds.ru/indexes/624/, соответственно]

интереса к исследуемой области, а именно к паровым горелкам: в 1918–1926 гг. (123 патента) и в 1985–2022 гг. (692 патента). Причем решались главным образом одни и те же задачи – повышение эффективности генерации энергии при сжигании жидкого топлива, снижение выбросов вредных веществ и уменьшение отложений на поверхностях камер сгорания.

Для первого пика патентования было характерно то, что патентовали только в одной области техники (тепловые процессы и аппараты) и только две страны – Германия и США. В этот период в промышленности весьма активно использовались паровые котлы: для приведения в движение машин и механизмов, для отопления зданий, а развитие железнодорожного транспорта еще более стимулировало их применение. В качестве топлива использовали главным образом уголь. На этот же период времени приходится "нефтяной бум": бурение нефтяных скважин в США (1859 г.), начало экспорта российской нефти (1882 г.), старт добычи нефти на острове Суматра (1892 г.), открытие крупного месторождения Spindletop в Техасе (1901 г.), рост производства нефти в Венесуэле (1922 г.). Цены на нефть упали, стало выгодно применять ее при производстве энергии (тепла) для промышленности, на транспорте (паровозы), в быту (печи). Однако при сжигании тяжелых углеводородов по имевшимся тогда технологиям возникали проблемы (распыление, "зарастание" поверхностей камер сгорания), для решения которых требовалось проведение научных исследований. Результатами этих исследований стали многочисленные патенты на горелочные устройства, оформленные в конце XIX – начале XX в. Например, изобретение "Oil burner", защищенное патентом США в 1922 г., относится к нефтяной промышленности, а именно к горелкам для сжигания сырой нефти и других тяжелых углеводородов для генерации энергии (выработки тепла). Повышение эффективности работы горелочного устройства достигается благодаря улучшению распыления нефти потоком пара и регулированию подачи нефти и пара в необходимой пропорции.

Второй пик патентования в исследуемой области характеризовался более длительным периодом интереса исследователей к данной теме. При этом число стран патентования и количество областей применения паровых горелок существенно увеличились. В указанный период доллар США уже использовался в качестве валюты для сделок с сырой нефтью на мировом рынке и политика влияла на цены на нефть и, следовательно, на экономику. Целый ряд событий, произошедших в это время, способствовал росту цен на нефть. Кроме того, было накоплено большое количество жидких углеводородных отходов: отработанных масел и смазочных жидкостей, некондиционных остатков топлив, отходов нефтепереработки и др., которые можно сжигать для получения тепла. Все это способствовало продолжению исследований и патентованию в области сжигания некондиционных жидких углеводородных топлив.

Распределение патентных семейств по странам приоритета (рис. 2) показывает, что лидерами являются США, Япония и Китай, подавшие вместе 54% всех заявок. При этом в десятке патентообладателей-лидеров половину составляют компании Японии. Также следует отметить, что ИТ СО РАН в списке 10 первых патентообладателей занимает почетное 8-е место (рис. 3).

Далее приведено распределение количества патентов на паровые горелки по областям патентования (по данным Questel https://www.orbit.com/):

Базы химических материалов	54
Экологические технологии	190
Пищевая химия	1
Гражданское строительство	5
Металлургические материалы	49
Нанотехнологии	1
Органическая химия	3
Медицинские технологии	4
Производство мебели	2
Фармацевтика	1
Химическая промышленность	78
Оптическое производство	2
Компьютерные технологии	1
Эксплуатация:	
двигателей, насосов, турбин	110
станков	2
прочих специальных машин	19
электротехнических аппаратов и машин	16
оборудования для текстильной и бумажной промышленности	2
Тепловые процессы и аппараты	692
Транспорт	6

Предлагаются решения по конструкциям горелочных устройств и их элементов (пусковых приспособлений, устройств для подогрева, распыления, испарения и регулирования подачи компонентов смеси), а также способам организации процесса сжигания. Решаемые задачи – увеличение полноты сгорания топлива и тепловой эффективности, уменьшение отложений на внутренних поверхностях камеры сгорания и выбросов вредных веществ.

Далее рассмотрены предложения некоторых компаний, занимающихся разработкой конструкций горелочных устройств.

В ряде последних решений компании Green Tech Co., Ltd (Республика Корея) предлагается горелочное устройство с автоматизацией подачи компонентов смеси – горелка для полного сжигания отработанного масла. Кроме того, предусмотрено применение эффекта Вентури с использованием сжатого воздуха для впрыскивания отработанного масла и воды и перегретого пара (из змеевика под давлением) во внутреннее пространство в конце камеры сгорания.

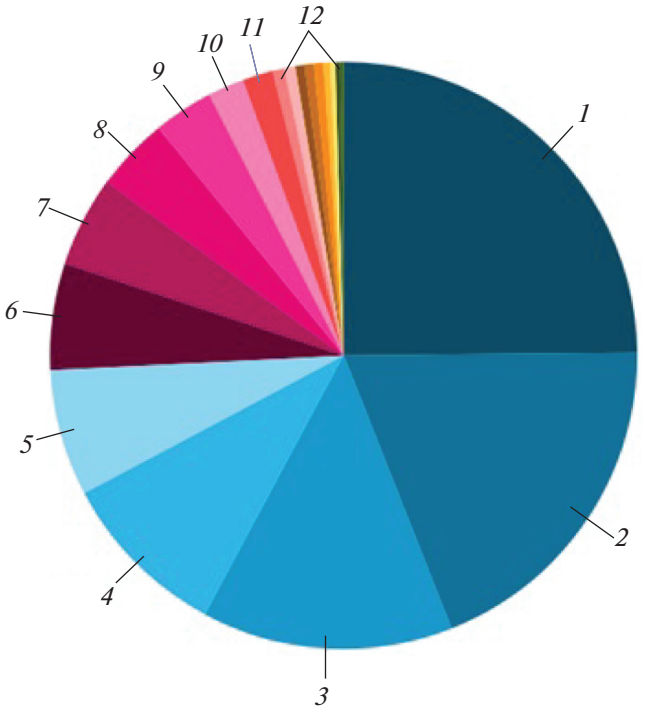


Рис. 2. Распределение патентных семейств по странам приоритета [по данным Questel https://www.orbit.com/. (© Questel) (07.2024)].
1 – Соединенные Штаты Америки (24.8%); *2* – Япония (19.2%); *3* – Всемирная организация интеллектуальной собственности (13.8%); *4* – Китай (9.4%) *5* – Германия (7.0%); *6* – Великобритания (5.9%); *7* – Республика Корея (5.0%); *8* – Европейское патентное ведомство (4.0%); *9* – Франция (3.3%); *10* – Швейцария (2.0%); *11* – Россия (1.70%); *12* – страны, оформившие менее 1.0% патентов

Для интенсификации процессов сжигания топлива и уменьшения выбросов вредных веществ компания KA Energy Co., Ltd (Республика Корея) предлагает к применению горелочные устройства с подачей перегретого водяного пара и вторичного воздуха по межтрубному пространству с закручиванием последнего лопастями в верхней части горелки. На выходе из горелки предусмотрено размещение каталитического нейтрализатора для разложения оксидов азота.

В Институте теплофизики СО РАН (Россия) предложено устройство с блоком двойного дутья, способствующего поддержанию внутри камеры газогенерации температуры, при которой жидкое топливо сразу испаряется без образования жидкого слоя (зеркала кипения), при этом закоксовывание топлива не происходит. Благодаря наличию камеры газогенерации можно в присутствии пара дополнительно генерировать OH-радикалы, что приводит к значительному увеличению скоростей химических реакций и устойчивому высокотемпературному горению, в том числе “тяжелых” топлив, при соблюдении экологических нормативов – отсутствии твердых углеродных ча-

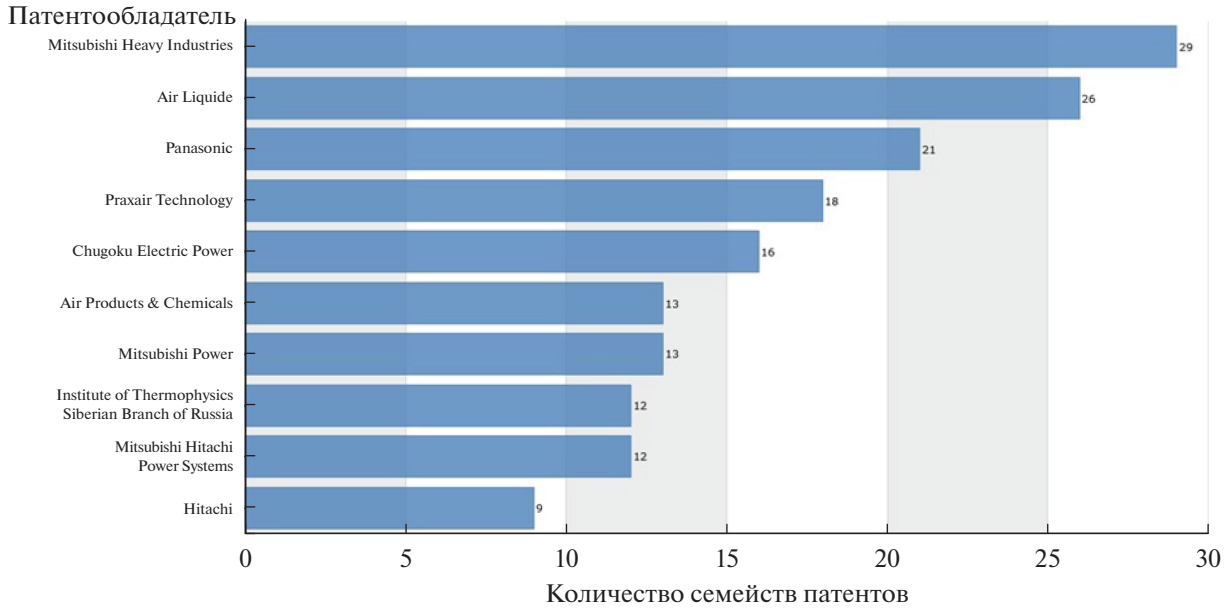


Рис. 3. Первые 10 патентообладателей [по данным Questel https://www.orbit.com/. (© Questel) (07.2024)]

стиц во внешнем пламени. Кроме того, возможность поддерживать внутри камеры газогенерации температуру, при которой жидкое топливо сразу испаряется, позволяет увеличивать подачу топлива более существенно, чем при использовании аналогов – паровых горелок, что повышает тепловую мощность без изменения габаритов устройства.

Компания John Zink (США), мировой лидер в области контроля выбросов вредных веществ и производства современных промышленных горелочных устройств, предлагает Y-образную конфигурацию каналов подачи смеси топливо – пар и пара в горелочном устройстве, что обеспечивает прямолинейное перемещение пара и угловое перемещение смеси топливо – пар. При угловом впрыске смеси топливо – пар создается конический (полый внутри конуса) поток, что уменьшает характерную толщину основной массы жидкости и увеличивает контактную поверхность, с которой сталкивается распыляемый пар, движущийся со скоростью звука.

В результате аналитического исследования было установлено, что патенты на горелочные устройства и их элементы, в первую очередь на распылительные устройства, компании-патентообладатели практически не продают и не предоставляют лицензии на их применение, а используют в собственном производстве. Например, распылительные устройства для горелочных устройств патентуют преимущественно компании США и Японии, а горелочные устройства – Республики Корея и России (прежде всего ИТ СО РАН). При этом компании США и Японии создают патентные семейства больших размеров, т.е. конкретное техническое решение патентуют в ряде стран, рынок которых представляет интерес для организации собственного производства и/или продажи продукции. В этом случае технические решения лучше защищены технологически и территориально. Крупные патентные семейства в рассматриваемой области создаются именно на распылительные устройства, позволяющие смешивать и распылять жидкое топливо, окислитель и перегретый водяной пар. Компании – правообладатели технических решений на распылительные устройства для горелок ведут политику, направленную на захват рынков в странах практически всех регионов, а именно: США, Канаде, Бразилии, Аргентине, Мексике, Испании, Германии, Австрии, Франции, Нидерландах, Бельгии, Италии, Великобритании, Китае, Японии, Тайване, Республике Корея, Индии, Сингапуре, Иране, Саудовской Аравии, Австралии.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ

Для низкокачественных топливных остатков характерны высокая обводненность, наличие механических примесей и т.п., что значительно усложняет процессы их воспламенения и обеспечения дальнейшего полного окисления [7]. Наиболее подходящими решениями могут стать предварительной пиролиз или газификация топлива с получением горючих газов [8] и пневматическое распыление – распыление топлива газовой средой (сжатым воздухом или паром) [9]. Основные продукты газификации – синтетическое топливо и синтез-газ [10]. В [11–13], например, рассматриваются процессы извлечения нефти из нефтешлама путем термического крекинга и катали-

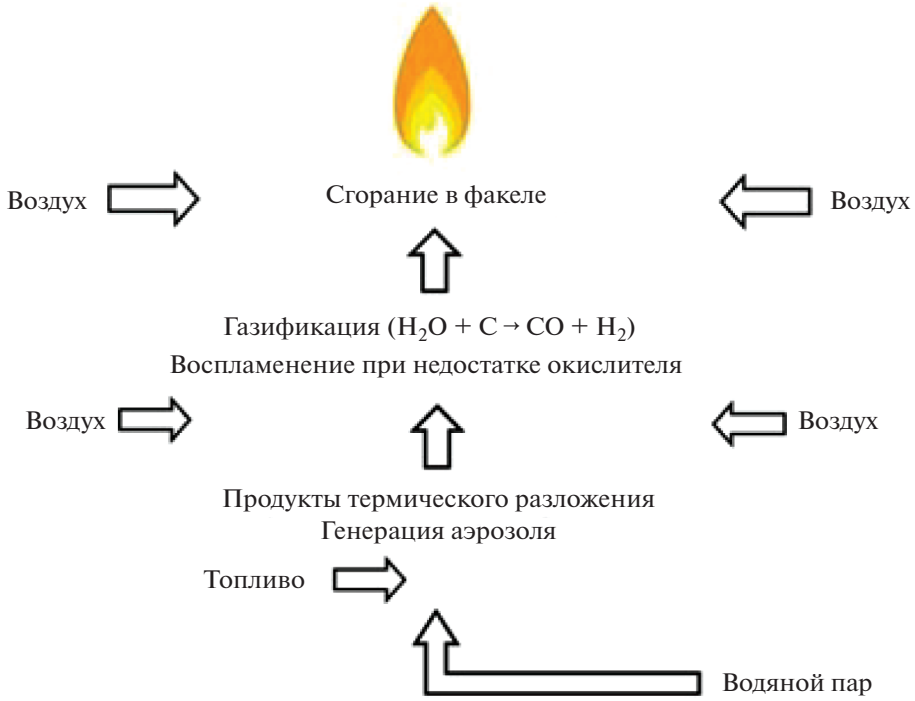


Рис. 4. Схема процессов в горелочном устройстве с распылением топлива струей перегретого пара

тического пиролиза. Аналогичную по тематике работу выполнили авторы [14]. Они приводят результаты исследования процесса извлечения нефти при добавлении пара и золы. Это позволило им значительно снизить долю углерода в продукте пиролиза.

В [15] рассмотрены кинетические параметры и влияющие на них факторы, а также характеристики продуктов, получаемых при работе реакторов пиролиза/газификации нефтешламов. Несмотря на значительные успехи в области предварительной газификация топлива с получением горючих газов для использования непроектных топлив, для реализации этого процесса требуются оборудование, имеющее высокую металлоемкость, точность выполнения условий внутри газификатора, а также стабильное по составу сырье для обеспечения возможности его полного сжигания при постоянном прогнозируемом качестве вырабатываемого газа.

Для увеличения производительности горелочного устройства при использовании непроектного топлива применяют его прямое сжигание. Для этого жидкости, содержащие твердые частицы разного размера, и жидкости различной плотности предпочтительно распылять, используя пневматические или паровые форсунки [16]. Существует множество вариаций и модификаций таких устройств [17], которые позволяют получать различные жидкости с разными параметрами. При этом оптимальный размер капель для их полного сжигания должен составлять 30 мкм [18]. Дальнейшее уменьшение их размера практически не влияет на качество сгорания [19]. Также главными параметрами, влияющими на характеристики распыла, являются давление распылителя и строение сопла [20].

Для прямого сжигания топлива помимо распыления в некоторых работах предлагается его предварительно газифицировать [21]. Однако зачастую имеются ограничения для воспламенения непроектного топлива при использовании испарения или пневматического распыления, а именно испарение можно применять при работе с легкими топливами [22], а сжигание при пневматическом распылении эффективно только в закрытой камере сгорания.

В устройствах, разработанных в ИТ СО РАН, типовая схема процессов в которых показана на рис. 4, для сжигания жидких непроектных углеводородных топлив предложено объединить испарение или пневматический распыл топлива с предварительной частичной паровой газификацией. При исследованиях на атмосферных горелочных устройствах испарительного типа с естественной подачей воздуха, а также с распылением паром с естественной подачей и наддувом воздуха, закруткой потока для дизельного топлива, отработанного масла, сырой нефти, мазута, гептана, керосина были получены высокие теплотехнические и экологические показатели работы устройства. Для дизельного топлива концентрация CO не превышала 30 мг/м^3, концентрация NO_x составила менее 100 мг/м^3.

Для совершенствования горелочной техники предлагаются следующие мероприятия:

интенсификация внутренней рециркуляции продуктов сгорания;

понижение температуры, при которой протекает сгорание топлива;

предварительная подготовка исходных составляющих сжигаемой смеси (подогрев, распыление);

автоматизация и управление горением;

предварительный пиролиз или газификация топлива с получением горючих газов;

пневматическое распыление – распыление топлива газовой средой (воздухом или паром).

Что касается сжигания смешанного топлива (пылеугольного и жидкого), то в настоящее время ведутся исследования в этом направлении. Такая технология имеет значительные перспективы вследствие дешевизны и распространенности угля. Но пока при сжигания двух видов топлива в одной камере не удается существенно понизить недожог и выбросы вредных продуктов сгорания.

ВЫВОДЫ

1. На рынке горелочных устройств, предназначенных для сжигания некондиционных жидких углеводородных топлив, применяемых в теплоэнергетике, предлагаются универсальные горелки, разработанные для сжигания отработанного масла. Совершенствование горелочных устройств направлено на решение таких проблем, как энергосбережение, универсальность по виду сжигаемого топлива и уменьшение выбросов вредных веществ. Несмотря на существенные недостатки жидкотопливных горелок, имеющихся на рынке в широком ассортименте, паровые горелки не внедряются в промышленность и остаются на стадии опытно-промышленных образцов.

2. С конца прошлого века интерес исследователей к сжиганию некондиционных жидких углеводородных топлив в присутствии перегретого водяного пара стал расти, особенно в США, Японии и Китае, которые подали начиная с 1985 г. более половины всех заявок на изобретения. Проводят исследования и активно патентуют также компании Республики Корея и России, причем Институт теплофизики СО РАН входит в список 10 первых патентообладателей. Паровые горелки патентуют для использования в 25 областях техники, особенно в сфере тепловых процессов и аппаратов.

3. Перспективные исследования проводятся с целью повысить эффективность сжигания низкокачественных топливных остатков, характеризующихся высокой обводненностью, наличием механических примесей и т.п. Исследуются возможности проведения предварительного пиролиза или газификации топлива с получением горючих газов, пневматического распыления топлива газовой средой (воздухом или паром) и др.

4. Технология сжигания некондиционного жидкого углеводородного топлива, разработанная в Институте теплофизики СО РАН, обладает высокой эффективностью и экологичностью, при этом горелочные устройства компактны и автономны.

5. При повышении цен на нефть и другие источники энергии, освоении отдаленных районов, не имеющих централизованного теплоснабжения, востребованность паровых горелок на рынке будет возрастать. Также перспективными являются разработки горелок для сжигания совместно твердого (пылеугольного) и жидкого топлив.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Экология** котельного отопления / Сайт ООО “СтройМонтажСервис”. https://smservis.ru/ekologiya-kotelnogo-otopleniya1 (Дата обращения 10.06.2024.)
2. **Сайт** компании “МАСТЕР ВАТТ” http://mega-watt.ru/oborudovanie/gorelki-elco/ek-evo/gazovyie-gorelki-ekevo (Дата обращения 10.06.2024.)
3. **Алексеенко С.В., Пащенко С.Э., Саломатов В.В.** Нанокластерное инициирование горения некондиционных углеводородных топлив // ИФЖ. 2010. Т. 83. № 4. С. 682–693.
4. **Сжигание** жидкого углеводородного топлива с паровой газификацией / С.В. Алексеенко, И.С. Ануфриев, М.С. Вигриянов, Е.П. Копьев, О.В. Шарыпов // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21. № 3. С. 411–414.
5. **Control** of liquid hydrocarbon combustion parameters in burners with superheated steam supply / E. Kopyev, V. Kuznetsov, A. Minakov, S. Alekseenko, O. Sharypov // Energies. 2024. V. 17. Is. 20. P. 5047.
6. **ГОСТ 20548-87.** Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью до 100 кВт. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 1987.
7. **Anufriev I.S.** Review of water/steam addition in liquid-fuel combustion systems for NO_x reduction: Waste-to-energy trends // Renewable Sustainable Energy Rev. 2021. V. 138. P. 110665. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110665
8. **An analysis** of waste/biomass gasification producing hydrogen-rich syngas: A review / J. Makwana, A.D. Dhass, P.V. Ramana, D. Sapariya, D. Patel // Int. J. Thermofluids. 2023. V. 20. P. 100492. https://doi.org/10.1016/J.IJFT.2023.100492
9. **Azzopardi B.J.** Drop sizes in annular two-phase flow // Exp. Fluids. 1985. V. 3. P. 53–59. https://doi.org/10.1007/BF00285271
10. **Higman C., Van der Burgt M.** Gasification. Elsevier, 2008. ISBN 9780750685283. https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8528-3.X0001-6
11. **Petroleum** oil and products recovery from oily sludge: Characterization and analysis of pyrolysis products / X. Jin, D. Teng, J. Fang, Y. Liu, Z. Jiang, Y. Song, T. Zhang, A.A. Siyal, J. Dai, J. Fu // Environ. Res. 2021. V. 202. P. 111675. https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2021.111675

12. **Castillo Santiago Y., Pérez J.F., Sphaier L.A.** Reaction-front and char characterization from a palm kernel shell – Oil sludge mixture under oxygen lean regimes in a fixed-bed gasifier // Fuel. 2023. V. 333. P. 126402. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.126402
13. **Ahmadi M.A., Masoumi M., Askarinezhad R.** Evolving connectionist model to monitor the efficiency of an in situ combustion process: Application to heavy oil recovery // Energy Technol. 2014. V. 2. P. 811–818. https://doi.org/10.1002/ENTE.201402043
14. **Effect** of steam and oil sludge ash additive on the products of oil sludge pyrolysis / S. Cheng, Y. Wang, T. Fumitake, T. Kouji, A. Li, Y. Kunio // Appl. Energy. 2017. V. 185. P. 146–157. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.10.055
15. **A review** on resource utilization of oil sludge based on pyrolysis and gasification / Z. Chu, Y. Li, C. Zhang, Y. Fang, J. Zhao // J. Environ. Chem. Eng. 2023. V. 11. P. 109692. https://doi.org/10.1016/J.JECE.2023.109692
16. **Ashgriz N.** Handbook of atomization and sprays. Springer US, 2011. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7264-4.
17. **Hede P.D., Bach P., Jensen A.D.** Two-fluid spray atomisation and pneumatic nozzles for fluid bed coating/agglomeration purposes: A review // Chem. Eng. Sci. 2008. V. 63. P. 3821–3842. https://doi.org/10.1016/J.CES.2008.04.014
18. **Danis A.M., Namer I., Cernansky N.P.** Droplet size and equivalence ratio effects on spark ignition of monodisperse N-heptane and methanol sprays // Combust. Flame. 1988. V. 74. P. 285–294. https://doi.org/10.1016/0010-2180(88)90074-0
19. **Odgers J., Kretschmer D., Pearce G.F.** The combustion of droplets within gas turbine combustors: some recent observations on combustion efficiency // J. Eng. Gas Turbines Power. 1993. V. 115. P. 522–532. https://doi.org/10.1115/1.2906739
20. **Heinrich S.** Influence of nozzle parameters on spray pattern and droplet characteristics for a two-fluid nozzle / K. Kramm, M. Orth, A. Teiwes, J.C. Kammerhofer, V. Meunier, S. Pietsch-Braune // Chem. Ing. Tech. 2023. V. 95. P. 151–159. https://doi.org/10.1002/CITE.202200152
21. **Anitescu G., Bruno T.J., Tavlarides L.L.** Dieseline for supercritical injection and combustion in compression-ignition engines: volatility, phase transitions, spray/jet structure, and thermal stability // Energy Fuels. 2012. V. 26. P. 6247–6258. https://doi.org/10.1021/EF301060G
22. **Lin R., Tavlarides L.L.** Thermal stability and decomposition of diesel fuel under subcritical and supercritical conditions // J. Supercrit. Fluids. 2013. V. 75. P. 101–111. https://doi.org/10.1016/J.SUPFLU.2012.12.026

Directions of Development of Combustion Technology of Liquid Hydrocarbon Fuel in Burner Devices in the Presence of Superheated Water Vapor

I. A. Sharina[a], *, E. P. Kopyev[a], and L. N. Perepechko[a]

[a] *Kutateladze Institute of Thermal Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

**e-mail: sharina@itp.nsc.ru*

Abstract—The article presents the results of an analysis of applied and fundamental research carried out by leading global universities and companies on burner devices designed for burning liquid hydrocarbon fuels in the presence of superheated water vapor used in thermal power engineering, including those developed taking into account patent information. Directions for increasing the efficiency of burner devices and their main developers and manufacturers have been identified. On the market of liquid fuel burners used in thermal power engineering, there are universal burners designed for burning different fuels, including substandard ones. Such burners are difficult to maintain, and their operation is accompanied by loud noise and emissions of harmful substances into the atmosphere. Despite the significant shortcomings of liquid fuel burners offered on the market, steam burners are not being introduced into industry, remaining at the stage of pilot industrial samples. Improvement of burner devices is aimed at solving such problems as energy saving, reduction of emissions of harmful substances, simplicity of devices, and their versatility in the type and quality of fuel burned. Companies in the United States, Japan, China, the Republic of Korea, and Russia are conducting research and actively filing patents for burner devices, with the Kutateladze Institute of Thermophysics (Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (IT SB RAS)) being among the top ten patent holders. Steam burners are patented for use in 25 areas of technology, primarily in the field of "thermal processes and apparatuses." Moreover, patent-holding companies hardly sell patents for burner devices and their elements and do not provide licenses for their use but use them in their own production. The work carried out by the authors allows us to determine the level of third-party technologies in comparison with the technologies of the Kutateladze Institute of Thermophysics (Siberian Branch, Russian Academy of Sciences) and to develop recommendations for further research based on patent, scientific, and other published information.

Keywords: burner device, liquid hydrocarbon fuel, substandard fuel, superheated water vapor, steam gasification, thermal power engineering, energy efficiency