

УДК 62-643; 533.6.08; 536.462; 544.332.3

СЖИГАНИЕ ЖИДКОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА С ПАРОВОЙ ГАЗИФИКАЦИЕЙ

Алексеев С.В.^{1,2}, Ануфриев И.С.^{1,2}, Вигриянов М.С.¹, Копьев Е.П.^{1,2}, Шарыпов О.В.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
630073, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

АННОТАЦИЯ

В оригинальном лабораторном образце горелочного устройства реализован способ беспламенного сжигания дизельного топлива. Данный режим обеспечивает резкую интенсификацию горения жидких углеводородов за счет подачи в зону горения струи перегретого водяного пара. С применением метода цифровой трассерной визуализации исследовано поле скорости во внешнем факеле горелочного устройства. Успешно апробирован способ засева высокотемпературного реагирующего потока трассерами – микроскопическими частицами оксида кремния, образующимися в факеле при добавлении силиконового масла в жидкое топливо. На основе термопарных измерений исследовано распределение температуры в факеле, установлено, что максимальная температура достигает 1500°C. На проточном калориметре проведены предварительные измерения тепловыделения при сжигании дизельного топлива в исследуемом режиме.

ВВЕДЕНИЕ

Дефицит качественных видов топлива, используемых в теплоэнергетике, обуславливает интерес к доступным низкокачественным видам топлив (в том числе – горючим производственным отходам: отработанным маслам и смазочным жидкостям, отходам нефтепереработки и др.). Их широкое использование в топливно-энергетическом балансе сдерживается отсутствием технологий сжигания, отвечающих современным требованиям эффективности и экологической безопасности. Этим обусловлена актуальность поиска и научного обоснования новых способов сжигания жидких углеводородов.

Предварительные исследования, проведенные в ИТ СО РАН на оригинальных горелочных устройствах мощностью 10-50 кВт [1-2], показали, что при подаче в зону горения перегретого водяного пара горение жидких углеводородов резко интенсифицируется. Данный способ беспламенного сжигания топлива [3] может оказаться перспективным способом утилизации низкокачественных топлив и опасных производственных отходов с производством тепловой энергии. Создание горелочных устройств, работающих в таком режиме, нуждается в научном обосновании новых технических решений, обеспечивающих высокую энергоэффективность и экологичность технологии, имеющей широкую область практического применения.

В данной работе исследуется процесс сжигания испаряющегося дизельного топлива при паровой газификации продуктов его термического разложения в лабораторной

модели горелочного устройства. Основной целью исследований на данном этапе являлось получение экспериментальных данных о структуре потока и распределении температуры во внешнем факеле горелочного устройства, необходимых для верификации разрабатываемой физико-математической модели процесса горения жидких углеводородов с паровой газификацией [4].

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Экспериментальные установки

Эксперименты проводились на огневом стенде для исследования сажепарового режима горения жидких углеводородов, оснащенном автономным горелочным устройством [5] с внешним топливным баком и системами измерения скорости и температуры. Горелочное устройство состоит из (см. рис. 1-а): цилиндрического корпуса (1) с топкой (2), топливопровода (3), воздухопроводов (4), встроенного парогенератора (5) с форсункой (6) и камеры газогенерации (7). Парогенератор содержит бачок-испаритель 300 см³ (8), паросепаратор (9), пароперегреватель (10). Давление в бачке-испарителе контролируется манометром. Нагрев воды и перегрев пара (~400°C), поступающего через форсунку в зону горения, обеспечиваются за счет тепловыделения реакции. Подача воздуха в горелку – естественная. Диаметр горелки 120 мм, высота 200 мм, диаметр выходного отверстия форсунки 0.5 мм. Все элементы изготовлены из стали марки 12Х18Н10Т.

В отсутствие струи пара формируется пламя, характерное для горения углеводородных топлив, содержащее большое количество сажи (рис. 1-б). При подаче струи перегретого водяного пара в первичный сажистый факел происходит паровая газификация продуктов термического разложения жидкого топлива с образованием синтез-газа, повышается температура факела, изменяется состав продуктов горения (отсутствует сажа). Переход к сажепаровому режиму горения четко фиксируется по образованию яркого короткого факела (рис. 1-в). При этом коксование внутренних поверхностей горелочного устройства не происходит.

Измерения поля скорости в факеле осуществлялись на основе метода цифровой трассерной визуализации (particle image velocimetry, PIV) с использованием PIV-системы «Полис» [2], разработанной в ИТ СО РАН. Измерительная система включает в себя: двойной импульсный Nd:YAG лазер Quantel EverGreen с энергией в импульсе 145 мДж (длина волны 532 нм, частота до 15 Гц, длительность импульса 10 нс); объектив для формирования лазерного ножа; высокоскоростную КМОП камеру PCO.1200hs с мини-

мальным временем экспозиции кадра 50 нс и частотой до 636 Гц при разрешении 1280×1024 пикселей; широкоугольный объектив Nikkor 28mm F/2.8 D (диаметр 52 мм); синхронизирующий процессор; персональный компьютер с программным обеспечением ActualFlow. Для подавления собственного излучения факела на объектив установлен оптический фильтр L.O.T.-Oriel с полосой пропускания 532 ± 10 нм.

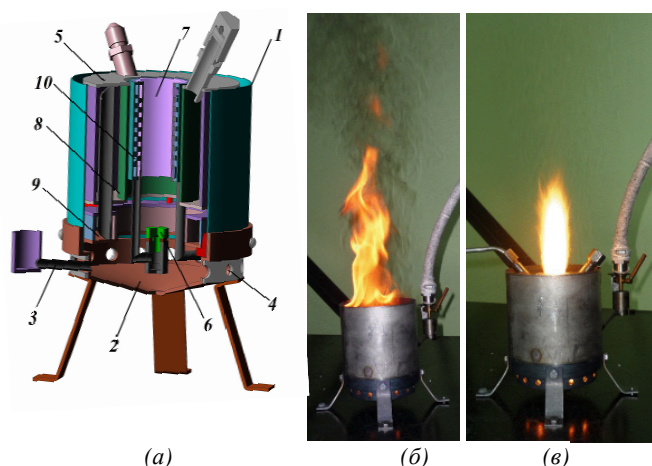


Рис. 1. Схема горелочного устройства (а); горение дизельного топлива без подачи пара (б); установившийся режим горения с паровой газификацией (в)

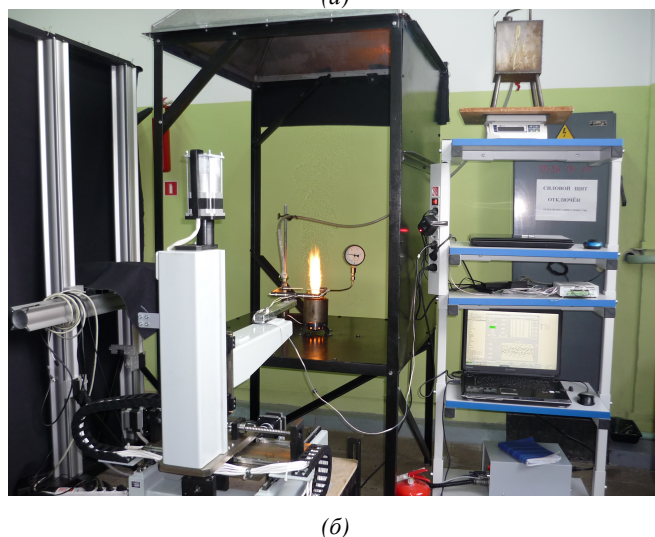
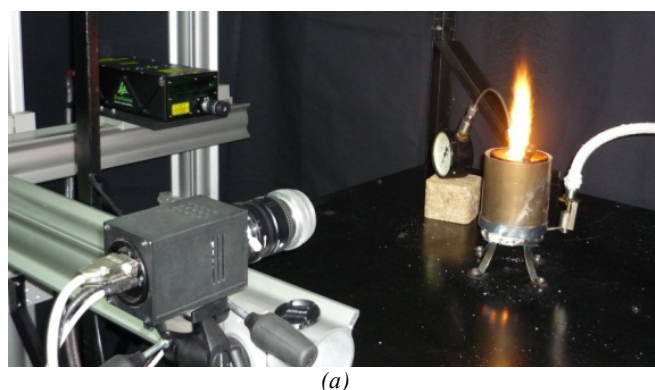


Рис. 2. Вид огневого стенда: (а) оснащенного PIV-системой; (б) оснащенного системой измерения температуры с КПУ

Для измерения температуры во внешнем факеле при сажепаровом режиме горения дизельного топлива использована платинородий-платинородиевая термопара типа В (Pt-30%, Rh / Pt-6%, Rh), диапазон 600...1600 °C (кратковременно до 1800°C), диаметр проволоки 0.3 мм (длина термоэлектродов 0.7 м). Тепловая инерция термопреобразователя не более 5 с. Пределы допускаемых отклонений ТЭДС от номинальных статических характеристик преобразователя ± 0.005 от значения измеряемой температуры. Термопара имела П-образную форму, а рабочий спай располагался посередине горизонтального отрезка буквы П. Термоэлектроды были защищены газонепроницаемым керамическим чехлом OMEGA-TRA-116316 (Al_2O_3 99%, до 1900°C) диаметром 5 мм. Термопара была закреплена на координатно-перемещающем устройстве (КПУ), см. рис. 2.

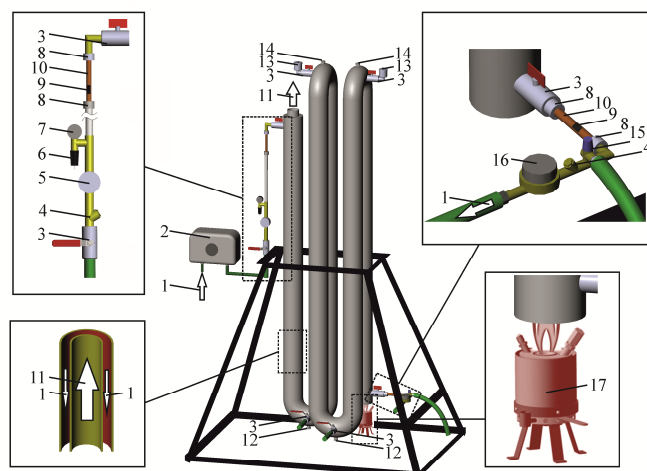


Рис.3. Схема проточного калориметра: 1 – направление движения теплоносителя; 2 – водонагреватель; 3 – шаровый кран; 4 – фильтр сетчатый; 5 – расходмер; 6 – цифровой датчик давления; 7 – манометр; 8 – фторопластовая термопарная развязка; 9 – термопара хромель-алюмелевая; 10 – медная трубка; 11 – направление движения уходящих газов; 12 – пробки для слива конденсата из внутренних труб; 13 – воздухоотводчик автоматический; 14 – патрубки для ввода измерительных зондов во внутренние трубы; 15 – предохранительный клапан; 16 – контрольный расходмер; 17 – горелочное устройство

Для измерения тепловыделения при сжигании дизельного топлива с паровой газификацией был создан проточный калориметр (рис. 3). Калориметр состоит из пяти последовательно соединенных секций (общая длина ~12 м). Каждая секция состоит из двух коаксиальных железных труб (толщина стенок 4 мм). Внутренний канал (с диаметром 68 мм) предназначен для потока воздуха и продуктов сгорания, а кольцевой канал (с шириной 10 мм) – для подачи теплоносителя (воды). В верхних коленах установлены автоматические воздухоотводчики из кольцевого канала и патрубки к внутреннему каналу для установки измерительных приборов. В нижних коленах установлены краны для слива теплоносителя, а также пробки для удаления конденсата из внутреннего канала. Внешняя поверхность покрыта теплоизолирующим материалом «термофлекс». Калориметр оснащен необходимыми измерительными приборами.

2.2. Методики измерений

Метод измерения поля скорости основан на регистрации перемещений частиц (трассеров), добавляемых в исследуемый поток. Микрокапли жидкости на основе глицерина, используемые при исследовании структуры изотермических турбулентных течений [6], не приемлемы для высокотемпературных потоков. В случае горения предварительно перемешанной газовой смеси в качестве трассеров обычно используют твердые микрочастицы оксида алюминия, титана, магния, кремния и т.д., выдерживающие тепловую нагрузку в пламени. В исследуемом горелочном устройстве такой способ засева потока трассерами тоже невозможен. Поэтому был выбран и отработан метод засева потока путём добавления силиконового масла (не более 5 %), имеющего низкую температуру кипения $\sim 170^\circ\text{C}$, обеспечивающей необходимый для PIV-измерений засев потока трассерами. Образующиеся частицы оксида кремния имеют размер ~ 1 мкм (что обеспечивает скоростное равновесие фаз) и хорошо различимы на PIV-изображениях. Выбранное решение является не только простым, но и эффективным, так как силиконовое масло хорошо растворяется в жидких углеводородах и при низкой концентрации не влияет на процесс горения (в отличие, например, от железосодержащих соединений), имеет относительно низкую стоимость, не токсично.

Измерялось пространственное распределение скорости в высокотемпературном турбулентном факеле, выходящем из горелочного устройства в окружающую атмосферу, при установившемся сажепаровом режиме горения дизельного топлива (расход топлива ~ 1 л/ч, расход пара ~ 0.3 кг/ч, постоянное давление в баке-испарителе 0.7 МПа, расход воздуха в горелку при естественной подаче ~ 8 м³/ч). Задержка между парой кадров 100 мкс, время между парами кадров (при максимальной частоте лазера 15 Гц) задавалось 70 мс. Для обработки данных использовался итерационный кросскорреляционный алгоритм расчёта полей скорости с разбиением расчётной области на ячейки размером 64×64 пикселей с пространственным перекрытием в 50 %. Измерения поля скорости проводены в плоскости симметрии факела, полученные данные о распределении двух компонент скорости (аксиальной и радиальной) полностью характеризуют поле скорости в осесимметричном стационарном (т.е. в осреднённом по времени) потоке. Суммарная погрешность PIV-измерений осреднённой скорости турбулентного потока – в пределах 10 % [6].

Измерения поля температуры проводились в плоскости симметрии факела. Рабочий конец термопары помещался в различные точки внутри факела (согласно плану) при помощи автоматизированного КПУ. Очень малая термо-ЭДС этого типа термопар до 100°C позволяет в нашем случае не учитывать изменения температуры свободных концов. Сигнал с термопары через АЦП LTR114 (24 бита, 4 кГц) поступал на компьютер. Автоматизированный сбор данных, визуализация, первичная обработка и сохранение осуществлялись с помощью специально разработанной программы. Основное назначение этой программы: синхронизация КПУ и АЦП; управление автоматизированным перемещением измерительной системы; визуализация сигналов в абсолют-

ных величинах в момент измерений; автоматизированный непрерывный сбор и сохранение данных в файл; одновременный синхронизированный запуск нескольких каналов. Последующая визуализация данных выполнялась в программе Origin. При проведении измерений были заданы: пространственный шаг сетки 5 мм по горизонтали, 10 мм по вертикали; измеряемая область 25×200 мм (охватывалась половина сечения факела в плоскости симметрии); время перемещения КПУ 3 с; задержка перед измерениями в точке 7 с; время измерения в точке 10 с; частота измерений в точке 200 Гц.

При calorиметрическом измерении тепловой энергии, выделяемой при сгорании топлива, в стационарных условиях контролировалась разность температуры теплоносителя на входе и выходе при заданном расходе теплоносителя и известном расходе топлива. Вода из центральной системы городского водоснабжения подается в calorиметр через проточный водонагреватель с начальной температурой, равной температуре окружающей среды $\sim 20^\circ\text{C}$. Потоки воды и продуктов сгорания имеют противоположные направления.

Температура воды на входе в calorиметр и на выходе измерялась с помощью хромель-алюмелевых термопар ($\varnothing 0.2$ мм). Термопары устанавливались на изолированную конденсаторной бумагой поверхность медных трубок, по которым проходил теплоноситель. Измерительные зоны были теплоизолированы от корпуса calorиметра при помощи фторопластовых вставок. Свободные концы термопар помещались в теплоизолированный сосуд, заполненный водой и льдом. Объёмный расход воды регулировался краном на входе в calorиметр и регистрировался с использованием водосчетчика с импульсным выходом ВСХд-20 (пределы относительной погрешности 2%; цена одного импульса 1 л). Вывод сигналов на компьютер осуществлялся с использованием АЦП LTR114. Сбор данных, их визуализация и экспорт производились в программе LGraph2. Масса дизельного топлива измерялась при помощи электронных весов Acom-PW-200-15 с погрешностью 2 г. Объёмный расход и температура газов, выходящих из calorиметра, измерялись с помощью цифрового термоанемометра AV9201 (погрешность измерения скорости 2%, температуры 0.5°C) и электронного термометра Termex ЛТ-300 (погрешность 0.05°C).

Факел горелочного устройства вводился во внутренний канал calorиметра при равенстве температуры воды на входе и на выходе. При расходе дизельного топлива ~ 0.8 кг/ч разность температуры воды на входе и на выходе не превышала 40°C . Длина канала calorиметра обеспечивала остывание продуктов сгорания до температуры $\sim 37^\circ\text{C}$ на выходе в атмосферу (при естественном расходе газов ~ 40 м³/ч). Измерения всех параметров проводились в течение 30 мин. после установления стационарного теплового режима. Основные потери тепла в описанной методике измерений связаны с теплоотводом в окружающую среду от поверхности горелочного устройства и теплом выходящих из calorиметра газов (суммарно в пределах 3 %).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 4-а показано PIV-изображение облака частиц оксида кремния, образованных в результате разложения силиконового масла. На рис. 4-б представлены характерные распределения средней по времени скорости потока в факеле (производилось осреднение 500 измерений с интервалом 70 мс). В отличие от химически инертной затопленной струи, зависимость аксиальной компоненты средней скорости от продольной координаты x оказывается немонотонной: на оси факела ее значение достигает максимума (30 м/с) на некотором расстоянии от среза горелки, что свидетельствует о неполном сгорании смеси до выхода в атмосферу (r – радиус).

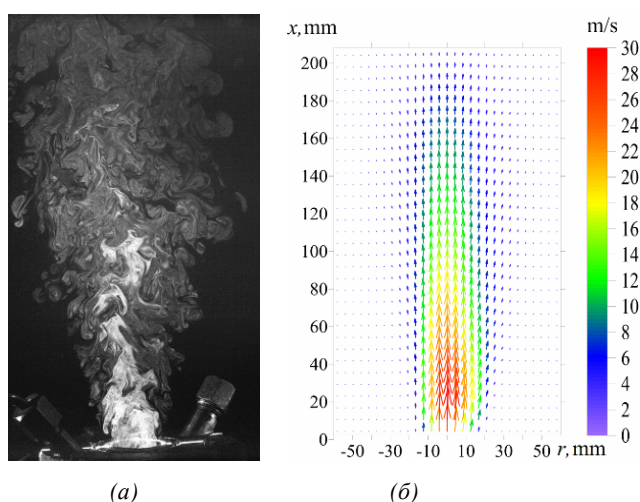


Рис. 4. PIV-фотография потока (а); векторное поле средней по времени скорости потока (б)

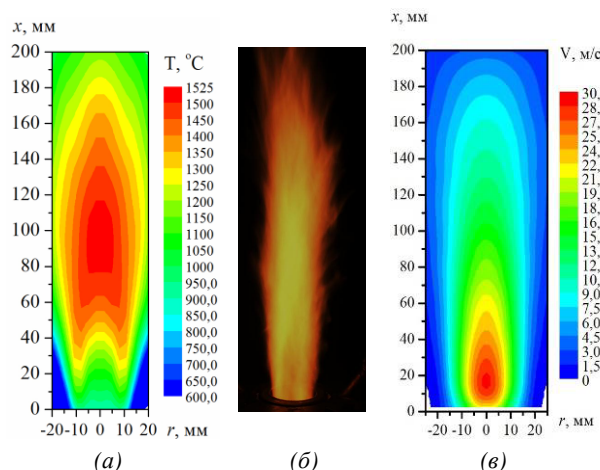


Рис. 5. Распределение средней во времени температуры в факеле (а); фотография факела (б); распределение аксиальной компоненты средней скорости (в)

На рис. 5-а приведены результаты измерений поля средней температуры. Анализ результатов термопарных измерений показывает, что область максимальной температуры (~1500°C) находится на расстоянии около 0.1 м от среза горелки. Вблизи выхода из горелки изотермы имеют коническую форму, что характерно для диффузионного режима горения. Это означает, что выходящий из горелки поток содержит компоненты, которые догорают по мере поступления окислителя из окружающей атмосферы.

Этому соответствует более темная область вблизи среза горелки на фотографии факела (см. рис. 5-б) и область с максимальной аксиальной скоростью потока (рис. 5-в).

Предварительные результаты калориметрических измерений показали, что даже при наличии указанных выше потерь тепла нагрев теплоносителя соответствует мощности ~10 кВт, что согласуется с известным значением высшей теплотворной способности дизельного топлива ~46 МДж/кг (согласно ГОСТ 21261-91) и свидетельствует о высокой полноте сгорания топлива в сажепаровом режиме. При этом дополнительной энергии для генерации пара не требуется, т.е. горелка полностью автономна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования горения дизельного топлива в автономном горелочном устройстве с подачей перегретого водяного пара свидетельствуют о том, что сажепаровый режим сжигания может быть эффективен при утилизации жидких углеводородов с получением тепловой энергии. Ключевая стадия процесса горения – паровая газификация продуктов разложения топлива – позволяет рассчитывать на достижение более высоких экологических характеристик по сравнению с технологиями сжигания, использующими повышенный расход воздуха. Новые данные могут быть использованы для верификации разрабатываемых физико-математических моделей изучаемого процесса.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН «Горение и взрыв», Программы совместных фундаментальных исследований СО РАН и НАНБ 2012-2014 гг., РФФИ (проект № 14-08-00177-а).

Список литературы:

1. Алексеенко С.В., Пашенко С.Э., Саломатов В.В. Нанокластерное инициирование горения некондиционных углеводородных топлив // ИФЖ. 2010. Т. 83, № 4. С. 682–693.
2. Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Дулин В.М., Копьев Е.П., Шарыпов О.В. Сажепаровый режим горения жидких углеводородов: распределение скорости в факеле горелки // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. Т.21, № 3. С.411-414
3. Пат. 2219435 Российская Федерация, Способ беспламенного сжигания топлива / М.С. Вигриянов, В.В. Саломатов, С.В. Алексеенко; Институт теплофизики СО РАН; заявл. 11.02.2002; опубл. 20.12.2003.
4. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Bobrova L.N., Dulyn V.M., Krasinsky D.V., Salomatov V.V., Sharypov O.V. Experimental and Numerical Study of Steam-Enhanced Regime of Liquid Hydrocarbon Fuel Combustion in a Pilot Burner // Proceedings of the European Combustion Meeting – 2013, June 25-28, 2013, Lund, Sweden. – Paper P3-72. – 6 p. ISBN 978-91-637-2151-9.
5. Пат. 2523591 Российская Федерация, Горелочное устройство. Вигриянов М.С., Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В. Опубл. 27.05.2014, заявка № 2013116229 от 09.04.2013.
6. Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Шадрин Е.Ю. Диагностика течения в вихревой топке нового типа методом цифровой трассерной визуализации // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, вып. 10. С. 36–43.

e-mail: anufriev@itp.nsc.ru