

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

УДК 62-643: 533.6.08

**Сажепаровой режим горения жидких углеводородов: распределение скорости в факеле горелки\***

**С.В. Алексеенко<sup>1,2</sup>, И.С. Ануфриев<sup>1</sup>, М.С. Вигриянов<sup>1</sup>, В.М. Дулин<sup>1</sup>,  
Е.П. Копьев<sup>1,2</sup>, О.В. Шарыпов<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

E-mail: anufriev@itp.nsc.ru

В оригинальном горелочном устройстве в лабораторных условиях реализован сажепаровый режим сжигания дизельного топлива. Данный режим обеспечивает резкую интенсификацию горения жидких углеводородов за счет подачи в зону горения струи перегретого водяного пара. На основе метода цифровой трассерной визуализации исследовано поле скорости в 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.

**Ключевые слова:** сажепаровый режим горения жидких углеводородов, горелочное устройство, анемометрия.

Дефицит доступных качественных видов топлива, используемых в теплоэнергетике, обуславливает интерес к дешевым 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. Одним из перспективных направлений создания таких технологий является сжигание низкокачественных углеводородных топлив в сажепаровом режиме (см. краткий обзор, представленный в работе [1]). Предварительные исследования, проведенные в Институте теплофизики СО РАН [1, 2], показали, что горение жидких углеводородов резко интенсифицируется при подаче в зону горения перегретого водяного пара. Имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные недостаточны для научного обоснования создания эффективных горелочных устройств, работающих в таком режиме. В настоящей работе изучается сажепаровой

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-08-00177-а), Программы Президиума РАН «Горение и взрыв», Программы совместных фундаментальных исследований СО РАН и НАНБ 2012-2014 гг. (проект № 6).

режим горения дизельного топлива в лабораторной модели горелочного устройства. Целью исследований являлось получение экспериментальных данных о распределении скорости в факеле, в котором происходит догорание продуктов газификации топлива ( $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ ) во внешней атмосфере.

Экспериментальный стенд для исследования сажепарового режима горения жидких углеводородов состоит из горелочного устройства с внешним топливным баком, манометром и системой вентиляции. Диаметр горелки — 120 мм, высота — 200 мм. Все элементы изготовлены из стали марки 12Х18Н10Т. Горелка состоит из (см. рис. 1, *a*) цилиндрического корпуса (1) с топкой (2), топливопровода (3), воздухопровода (4), встроенного парогенератора (5) с форсункой (6) и камеры газогенерации (7). Парогенератор содержит бачок-испаритель объемом  $300 \text{ см}^3$  (8), паросепаратор (9), пароперегреватель (10). Поток пара генерируется за счет тепла, выделяемого при горении.

В отсутствие пара формируется характерное для горения углеводородного топлива пламя, содержащее большое количество сажи (рис. 1, *b*). При подаче струи перегретого водяного пара в первичный сажистый факел происходит паровая газификация продуктов разложения топлива с образованием  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ , температура факела достигает  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ , изменяется состав продуктов горения (отсутствует сажа). Переход к сажепаровому режиму горения четко фиксируется по образованию яркого короткого факела (рис. 1, *c*).

Измерения поля скорости в факеле осуществлялись на основе метода цифровой трассерной визуализации с использованием PIV-системы (particle image velocimetry) «Полис», разработанной в ИТ СО РАН. Измерительный комплекс 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 минимальным временем экспозиции кадра 50 нс и частотой до 636 Гц при разрешении  $1280 \times 1024$  пикселей, широкоугольный объектив Nikkog 28 mm F/2.8 D (диаметр 52 мм), синхронизирующий процессор, персональный компьютер с программным обеспечением ActualFlow. Для подавления собственного излучения факела использован оптический фильтр L.O.T.-Oriel с полосой пропускания  $532 \pm 10 \text{ нм}$ , установленный на объектив.

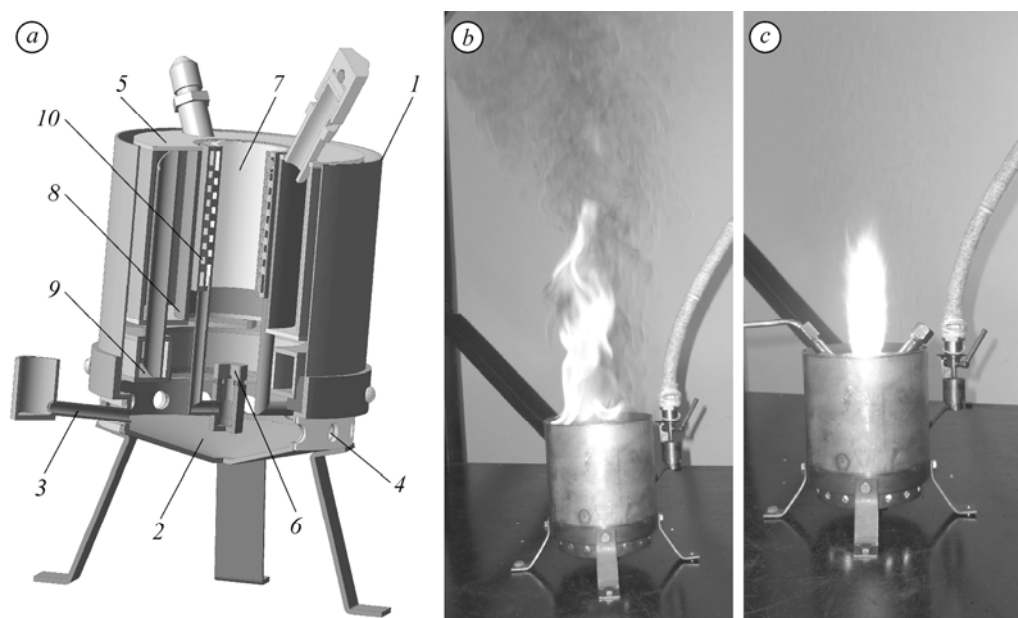


Рис. 1. Схема горелочного устройства (*a*), горение дизельного топлива без подачи пара (*b*), установившийся сажепаровый режим горения (*c*).

Метод измерения поля скорости основан на регистрации перемещений частиц (трассеров), добавляемых в исследуемый поток. При исследовании структуры изотермического турбулентного закрученного течения в модели вихревой топки [3] использовались микрокапли жидкости на основе глицерина, однако этот способ, очевидно, неприемлем 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 в жидкое топливо. Добавление силиконового масла (не более 5 %), имеющего низкую температуру кипения  $\sim 170$  °С, обеспечивает необходимый для PIV-измерений засев потока трассерами. Образующиеся частицы оксида кремния имеют размер  $\sim 1$  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 турбулентного течения в высокотемпературном факеле, выходящем из горелочного устройства в окружающую атмосферу, при установившемся сажепаровом режиме горения дизельного топлива (средний расход топлива составляла 1 л/ч, постоянное давление в бачке-испарителе 0,7 МПа). 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 расчета полей скорости с разбиением расчетной области на ячейки размером  $64 \times 64$  пикселей с пространственным перекрытием в 50 %. Измерения поля скорости течения проведены в плоскости симметрии факела, полученные данные о распределении двух компонент скорости (аксиальной и радиальной) полностью характеризуют поле скорости в осесимметричном стационарном (т. е. в осредненном по времени) потоке. Суммарная погрешность PIV-измерений осредненной скорости турбулентного потока не превышает 10 % [3].

На рис. 2, *a* показано PIV-изображение облака частиц оксида кремния, образованных в результате разложения силиконового масла. На рис. 2, *b* представлены характерные

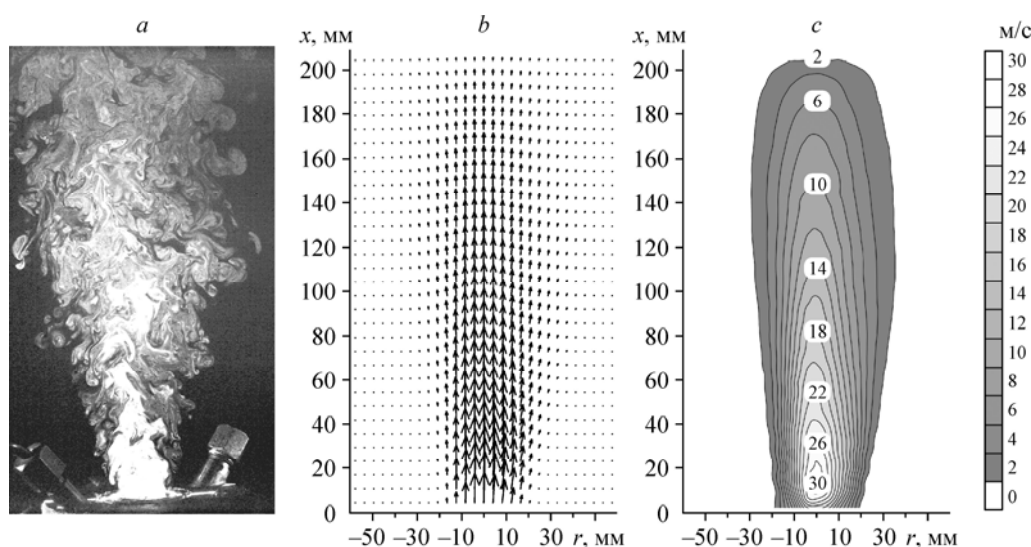


Рис. 2. PIV-фотография потока (*a*), векторное поле средней по времени скорости потока (*b*), распределение аксиальной компоненты средней скорости, м/с (*c*).

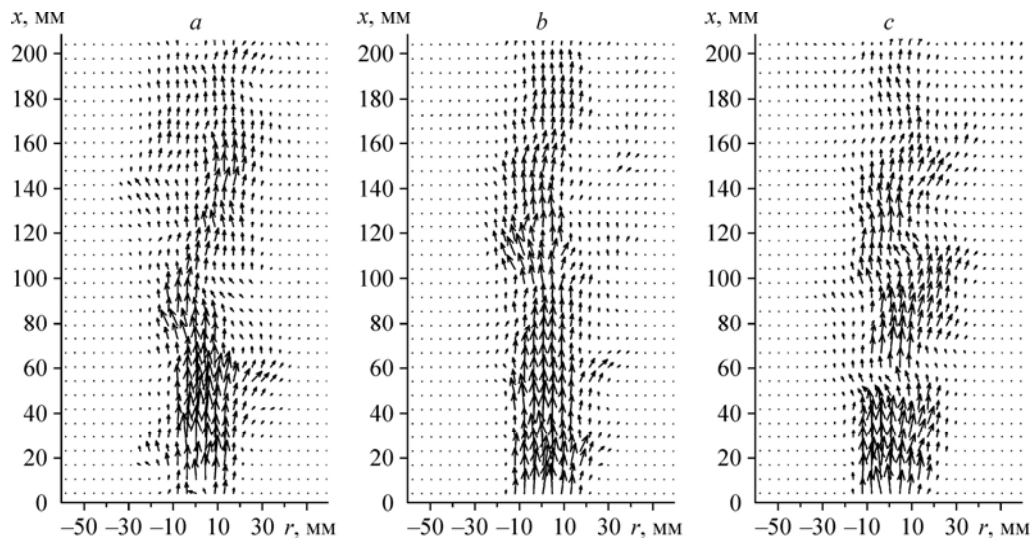


Рис. 3. Поле мгновенной скорости в последовательные моменты времени с интервалом в 70 мс.

распределения средней по времени скорости потока в факеле (производилось осреднение результатов 500 измерений с интервалом 70 мс). В отличие от химически инертной затопленной струи, зависимость аксиальной компоненты средней скорости от продольной координаты  $x$  оказывается немонокотонной: на оси факела ее значение достигает максимума (30 м/с) на некотором расстоянии от среза горелки (см. рис. 2,  $c$ ), что свидетельствует о неполном сгорании смеси до выхода в атмосферу ( $r$  — радиальная координата, отсчитываемая от оси горелки).

Поля мгновенной скорости (рис. 3) демонстрируют сложную нестационарную структуру турбулентного потока, пульсации скорости по модулю достигают 34 м/с. Наблюдаемое отклонение от стационарной осесимметричной структуры течения может быть связано не только с наличием хаотических пульсаций, но и с развитием неустойчивости, в том числе — в форме организованного движения в азимутальном направлении.

Проведенные на огневом стенде опыты по сжиганию дизельного топлива в сажепаровом режиме демонстрируют существенное влияние водяного пара на основные характеристики процесса. Разработана методика измерений на основе метода цифровой трассерной визуализации и получены экспериментальные данные о распределении скорости в факеле, дополняющие сведения об основных характеристиках сажепарового режима горения жидких углеводородных топлив. Новые данные могут быть использованы для верификации разрабатываемых математических моделей.

### Список литературы

1. Алексеев С.В., Пашенко С.Э., Саломатов В.В. Нанокластерное инициирование горения некондиционных углеводородных топлив // Инженерно-физический журнал. 2010. Т. 83, № 4. С. 682–693.
2. Пат. 2219435 РФ, МПК 7 F23C11/00, F23L 7/00. Способ беспламенного сжигания топлива / Вигриянов М.С., Саломатов В.В., Алексеев С.В.; Заявитель и патентообладатель Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН; № 2002103813/062002103813; заявл. 11.02.2002; опублик. 20.12.2003.
3. 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.

Статья поступила в редакцию 1 октября 2013 г.