

УДК 628.475.4

ГАЗИФИКАЦИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ¹

© 2019 г. А. С. Зайцев^{1,*}, Р. И. Егоров^{1,**}, П. П. Ткаченко¹, М. В. Белоногов¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия

*e-mail: alexzaitsev@tpu.ru

**e-mail: rommel@tpu.ru

Поступила в редакцию 22.03.2018 г.

После доработки 08.05.2018 г.

Принята к публикации 24.10.2018 г.

В работе проанализированы процессы, протекающие при взаимодействии мощных наносекундных лазерных импульсов, с водоугольной смесью, приготовленной из отходов переработки газового угля. Показано, что при интенсивности лазерного излучения более 8 Дж/см² скорость производства смеси СО и Н₂ резко возрастает. Это выражается в резком росте концентрации горючих компонентов синтез-газа (СО – до 0.57 об. %) и в заметном ускорении роста массы газо-аэрозольной топливной смеси при поглощении лазерных импульсов (на 40%). При низких плотностях энергии импульсов доминирует процесс генерации тонкораспыленного (размер частиц 30–70 мкм) топливного аэрозоля. При превышении эффективного порога абляции стартует газификация, когда соотношение масс синтез-газа и тонкораспыленного аэрозоля достигает 1:3. Таким образом, воздействие лазерными импульсами позволяет конвертировать отходы углеобогащения в легко воспламеняющуюся газо-аэрозольную топливную смесь.

Ключевые слова: газификация, водоугольная суспензия, утилизация отходов, лазер, синтез-газ, аэрозоль

DOI: 10.1134/S0023117719010109

ВВЕДЕНИЕ

Российская Федерация – одна из ведущих стран по объемам добычи и экспорта каменного угля. По данным ЦДУ ТЭК, в 2016 г. в России было добыто 385.7 млн т угля, и эта цифра с каждым годом лишь увеличивается. [1]. В свою очередь уголь является пятым экспортным продуктом в России, после нефти, нефтепродуктов, газа и черных металлов. По объемам экспорта угля Россия регулярно занимает третье-четвертое место в мире [2]. Согласно программе развития угольной промышленности России на период до 2030 г. [3] планируется увеличение объемов добычи угля до 530 млн т, с соответствующим увеличением доли экспорта в поставках угольной продукции за этот период до 49.4%. Также предполагается нарастить долю комплексного использования отходов угольного производства до 45%.

Для увеличения конкурентоспособности российского угля необходимо соблюдать высокие требования к качеству экспортируемого угля (ка-

лорийность, влажность, зольность). Для этого необходимо добиваться высокой степени его обогащения. На данный момент типичный выход шлаковых хвостов при обогащении углей составляет 0.15–0.35 т/т угля [4]. В настоящее время в мире применяют различные методы для обогащения каменного угля [5–9]: гравитационный, флотационный, магнитный, электрический. Меньшее распространение получили специальные методы обогащения: рентгенометрическая сепарация, магнитогидродинамическое обогащение, химическое обогащение. Выбор оптимального метода обусловлен свойствами ископаемого угля, техникой и технологией обогащения, технико-экономическими индикаторами. При обогащении угля флотационным методом при сгущении угольно-шламовой суспензии с применением поверхностно-активных веществ (флокулянтов) образуется влажный высокозольный остаток с высокой концентрацией твердых частиц (фильтр-кек). Характерные размеры твердых частиц кеков в водоугольной суспензии составляют 80–120 мкм [5–9].

Отвалы отходов углеобогащения занимают большие земельные площади и ухудшают экологическую обстановку на прилегающих к ним территориях. Вследствие выветривания залежи

¹ Исследования выполнены за счет средств субсидии на государственную поддержку ведущих университетов РФ в целях повышения их конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров (проект ВИУ-ИШФВП-299/2018).

отходов загрязняют воздух мелкими частицами (с существенной вероятностью их возгорания), подземные и поверхностные воды, т.е. являются мощными источниками загрязнения окружающей среды. Рациональное использование указанных отходов позволяет получить эффективный источник дешевых энергоносителей, параллельно сокращая загрязнение окружающей среды продуктами промышленной деятельности.

Зольность отходов лучших обогатительных фабрик России обычно находится в пределах 70–88%. Однако эта величина может сильно варьироваться для отходов углей, добытых и обогащенных в различных регионах России. Так, доступные в качестве объекта исследования фильтр-кеки углей марки Г (Кемеровская область) имеют зольность 33.82%.

На данный момент известны различные способы утилизации полученных отходов с параллельным производством тепловой энергии (пиролиз, газификация, непосредственное сжигание в составе смесевых топлив и т.п.). В исследованиях [10–13] показано, что очень перспективным и эффективным путем утилизации является сжигание отходов в виде водоугольных суспензий (ВУС). Горение ВУС демонстрирует хорошие экологические показатели по выбросам оксидов серы и азота, а также летучей сажи, что относится к явным преимуществам данного метода. Но у этого метода имеются и недостатки, например проблемы с хранением и транспортировкой водоугольной суспензии в северных районах, а также необходимость в модернизации котельного оборудования для сжигания ВУС. При этом снижение калорийности водоугольных композиций на основе отходов углеобогащения (относительно показателей сухих отходов) задает очень низкий уровень тепловой эффективности таких топлив.

Принципиально иной подход к утилизации отходов углеобогащения реализован при использовании различных технологий газификации углей [14–16]. Нагрев выше температуры пиролиза (800–1000°C) позволяет превратить практически любые органические композиции в смесь горючих газов (СО, Н₂, СН₄ и др.). Продукты газификации (синтез-газ [16]) обладают гораздо более высокой удельной теплотворной способностью в силу лучшего смешивания с воздухом, превосхо-

дя даже высококлассные угли. Они могут быть использованы в традиционных камерах сгорания газовых промышленных нагревателей с минимумом модификаций. Однако в большинстве случаев при газификации углей [10–12] используются крупногабаритные установки, работающие при температурах 800–1000°C и высоких давлениях (до 20 атм и более), что зачастую неприемлемо по соображениям пожаро- и взрывобезопасности. Газификация высокзолых угольных шламов также сопряжена с необходимостью регулярного удаления большого количества золы из высокотемпературного реактора, что существенно усложняет и удорожает процесс переработки отходов.

В данной работе предложен адресный нагрев топливной смеси мощными лазерными импульсами, в результате чего может быть реализована ее газификация при атмосферном давлении и при низких (до 100°C) *средних* температурах в рабочем объеме. Одно из преимуществ данного метода в отличие от традиционной газификации (процессы Фишера–Тропша, Лурги и т.п.) [16] – это возможность простого удаления любого количества золы из рабочего объема, а также низкие рабочие температуры. Цель данного исследования – определение оптимальной интенсивности лазерного излучения, позволяющей эффективную газификацию топливной смеси. Отдельно рассматривается влияние интенсивности лазерного излучения на скорость конверсии топлива в синтез-газ, равно как и на состав синтез-газа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования особенностей газификации водоугольной смеси потоком мощных лазерных импульсов были подготовлены образцы топлива из отходов углеобогащения. Основным горючим компонентом был выбран фильтр-кек каменного угля марки Г (с обогатительной фабрики шахты им. Кирова, Кемеровская область), который обладает хорошей смачиваемостью водой, а также имеет высокое содержание связанных летучих веществ [17, 18]. Результаты технического анализа данного фильтр-кека представлены в табл. 1, а его элементный состав (% на *daf*) – в табл. 2. Образец топлива готовили в виде суспензии, состоя-

Таблица 1. Результаты технического анализа использованного фильтр-кека Г

Показатель	Значение показателя
Доля твердой части в исходном угольном шламе, %	46.9
Теплота сгорания во влажном состоянии, МДж/кг	10.4
Теплота сгорания в сухом состоянии, МДж/кг	22.16
Выход летучих веществ (<i>V^{daf}</i>), %	43.11
Зольность, %	33.82

шей из 60 мас. % сухого порошка фильтр-кека и 40 мас. % воды. Порошок перемешивали с водой механическим миксером в течение 15 мин, что позволяло получить суспензию, которая не расслаивалась в течение эксперимента. Размеры частиц угля варьировались в диапазоне ~110–250 мкм с наиболее вероятным размером порядка 200 мкм. Масса единичной порции топлива, составляющая ~0.3 г, контролировалась электронными весами.

Влияние лазерного излучения на топливную смесь исследовалось двумя путями. В первом эксперименте анализировалась зависимость состава синтез-газа от интенсивности лазерного излучения. Принципиальная схема экспериментального стенда показана на рис. 1.

Образец топлива (Т) помещался на специальный металлический держатель (Д), установленный внутри медной камеры (К) с внутренним объемом около 2 см³. Окно на боковой поверхности камеры предназначено для введения лазерного пучка, нагревающего образец.

Окно закрыто стеклом, предотвращающим выбросы микроскопических частиц топлива наружу. Забор газообразных продуктов конверсии топлива производился через верхнее отверстие в камере, подключенное к газоанализатору (ГА). Расположенное внизу камеры третье отверстие (О) служит для подведения обратного потока газа, выходящего из анализатора. Таким образом, формируется замкнутый контур циркуляции синтез-газа, исключающий подсос воздуха извне. Для анализа состава продуктов газификации использовался газоанализатор марки “Boner” Test-1, который позволяет измерять концентрации основных продуктов сгорания, таких как CO, CO₂, H₂, а также анализировать содержание в газовой смеси кислорода, оксидов серы и азота, насыщенных углеводородов (калиброван по метану). Точность измерений газоанализатора (систематическая погрешность не превышает 6% от измеряемой величины) позволяет достаточно качественно проводить анализ состава синтез-газа.

Для мониторинга изменения массы порции топлива во время газификации использовалась упрощенная схема, когда магистрали газоанализатора отключались, а камера ставилась на платформу электронных аналитических весов (АВ). Данные весы (ViBRA AF 225 DRCE) позволяют измерять массу образца с точностью до 10 мкг. Изменение массы топлива фиксировалось в зависимости от количества поглощенных лазерных импульсов.

В качестве источника излучения при газификации топливных смесей использовался импульсный лазер марки *Quantel Evergreen 200* (длина волны $\lambda = 533$ нм, энергия одиночного импульса до 200 мДж и длительность импульса 10 нс).

Таблица 2. Элементный состав фильтр-кека Г

Элементный состав	% на <i>daf</i>
C	75.12
H ₂	4.64
SO ₂	0.23
NO	0.02
SiO ₂	52–79
Al ₂ O ₃	14–31
Fe ₂ O ₃	3–16

Частота повторения пар импульсов была установлена в 3 Гц, что обеспечивало *среднюю* мощность светового излучения в диапазоне 0.2–1.806 Вт. Диаметр пятна лазерного излучения на образце составлял ~1.5 мм, а плотность энергии одиночного светового импульса при проведении газоанализа 2–17.1 Дж/см².

Известно [19, 20], что порог абляции органических соединений наносекундными импульсами видимого света превышает 0.2 Дж/см². Выбранная в работе минимальная плотность энергии лазерного излучения гарантированно превышает данную пороговую величину, позволяя производить эффективное “испарение” угольного порошка. Импульсный режим работы лазера также дает возможность исключить интенсивный нагрев образца топлива при высоком

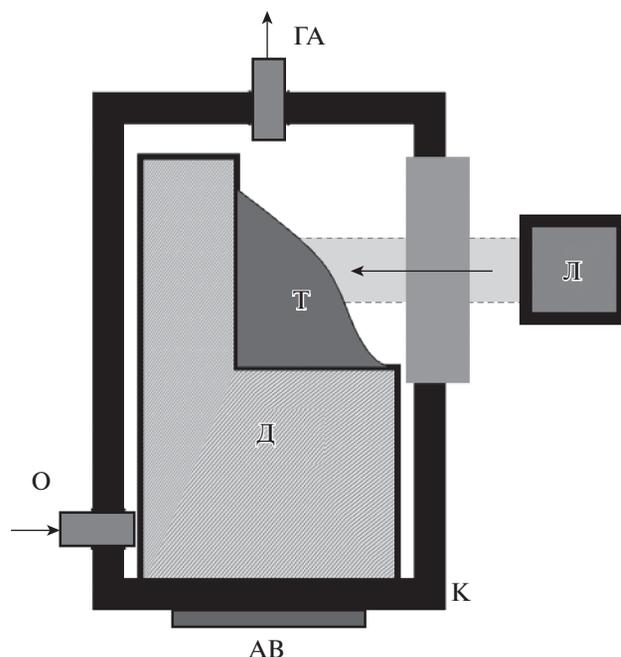


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда: Л – лазер, Д – держатель, Т – топливо, АВ – аналитические весы, К – камера, ГА – газоанализатор, О – обратная подача.

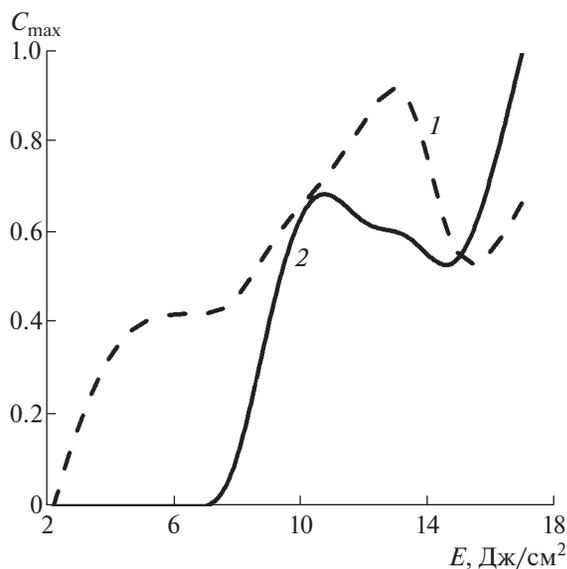


Рис. 2. Зависимость максимальных концентраций горючих компонентов синтез-газа от плотности энергии импульсов (1 — водород, 2 — оксид углерода). Пиковые концентрации газов, использованные при нормировке зависимостей на рисунках: $C_{\max}^{\text{CO}} = 5656.6$ ppm, $C_{\max}^{\text{H}_2} = 927.7$ ppm.

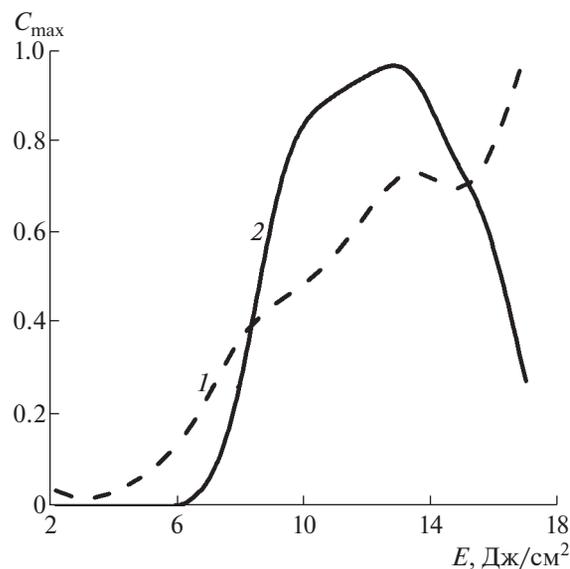


Рис. 3. Зависимость максимальных концентраций вредных компонентов синтез-газа от плотности энергии импульсов (1 — диоксид серы, 2 — оксиды азота). Пиковые концентрации газов, использованные при нормировке зависимостей на рисунках: $C_{\max}^{\text{NO}} = 16.4$ ppm, $C_{\max}^{\text{SO}_2} = 447.1$ ppm.

уровне пиковой мощности излучения. Для лазерной газификации водоугольной смеси использовался простой подход, когда коллимированный лазерный пучок освещал поверхность образца топлива внутри рабочей камеры. Потери на отражение в стекле практически не превышали 4%, обусловленные френелевскими зависимостями для коэффициентов отражения. Лазерный импульс практически полностью поглощался образцом (коэффициент поглощения в видимом диапазоне близок к единице), что приводило к испарению воды и абляции углерода в результате быстрого нагрева. Скорость нагрева частиц угля в пределах светового пятна можно оценить исходя из результатов вычислений, проведенных в работе [21]. При заданной длительности импульсов сухие квази-сферические частицы угля размером 100 мкм будут нагреваться со скоростью от 300 до 2000°С/имп в зависимости от плотности энергии импульсов (от 2 до 17.1 Дж/см²). Нагрев частиц влажного фильтр-кека, очевидно, пойдет заметно медленнее за счет того, что испаряющаяся вода будет уносить существенное количество энергии. Однако предполагая многократное (в течение сотни секунд с частотой 3 Гц) воздействие импульсами на частицы угля, а также быстрое высыхание топливной смеси, можно ожидать, что в течение процесса температуры частиц угля в пятне лазерного излучения достигают значений свыше 2000°С.

Важным сопутствующим процессом был выброс некоторого количества микроскопических частиц суспензии наружу вследствие микровзрыва на поверхности порции топлива при попадании лазерного импульса. Из предварительных исследований с помощью метода *Particle Tracking Velocimetry (PTV)* известно, что выброшенные частицы (капли воды и микрочастицы угля) имеют наиболее вероятный размер порядка 35 мкм. Начальные скорости выброшенных частиц достигают 3 м/с с наиболее вероятными значениями порядка 0.3–0.5 м/с.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для определения зависимости эффективности лазерной газификации водоугольных смесей от плотности энергии импульсов были проведены две серии экспериментов. В ходе первой серии анализировался химический состав синтез-газа для разных плотностей энергии импульсов. На рис. 2 показана динамика пиковых концентраций основных горючих и вредных компонентов синтез-газа в выбранном диапазоне. Величины концентраций, представленных на графике (рис. 2 и 3), нормированы на максимальное наблюдавшееся значение для удобства отображения. Нормировочные множители (C_{\max}^i), описывающие пиковую концентрацию каждого газа, приведены на рис. 2 и 3.

Из рис. 2 следует, что существует четкий порог плотности энергии лазерных импульсов (~ 8 Дж/см²), после достижения которого наблюдается интенсивное производство СО на облучаемой поверхности топлива. Генерация оксидов азота (рис. 3) также стартует после достижения данного порогового значения интенсивности лазерного излучения. Производство диоксида серы и водорода начинается при меньших интенсивностях и демонстрирует квази-линейную зависимость с ростом интенсивности излучения от 2.5 до 13–13.5 Дж/см². Спад производства водорода и торможение производства диоксида серы при плотностях энергии импульсов более 13 Дж/см² могут объясняться усилением процессов выброса микрочастиц топливной смеси при таких плотностях энергий импульсов.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что воздействие лазерных импульсов приводит к возникновению двух различных типов процессов газификации топлива. Выделение водорода и диоксида серы, очевидно, являются беспороговыми процессами, которые стартуют даже при низких интенсивностях лазерных импульсов. Производство СО и NO_x стартуют, только когда плотность энергии лазерных импульсов превосходит 8 Дж/см². Данный факт означает, что производство СО и NO_x, по-видимому, имеет абляционную природу и происходит на поверхности капли топлива, а образование водорода и диоксида серы в основном зависит от нагрева подповерхностных слоев топлива и стартует даже при низких уровнях плотности энергии лазерных импульсов.

При попадании мощного импульса на поверхности капли водоугольной суспензии происходит микровзрыв, приводящий к выбросу микроскопических капель воды и частиц фильтр-кека.

Часть угольных частиц, поглотившая существенную часть энергии импульса, разогревается в присутствии воды. Водяная шуба достаточно долго ограничивает свободный доступ кислорода к поверхности частиц угля, что способствует процессам пиролиза, частично высвобождая связанные летучие вещества. Этим объясняется старт выделения водорода и диоксида серы даже при низких уровнях интенсивности лазерных импульсов. При превышении уровня в 8 Дж/см² процессы абляции углерода с поверхности частиц угля становятся достаточно интенсивными, что и приводит к запуску производства СО.

Таким образом, воздействие мощных лазерных импульсов на каплю водоугольной суспензии выражается в двух доминирующих процессах:

– формирования тонкораспыленного водоугольного аэрозоля с достаточно быстрым сниже-

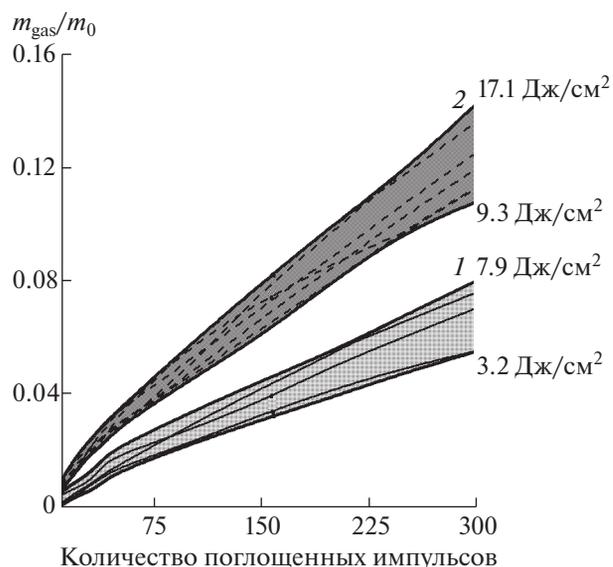


Рис. 4. Зависимость изменения массы образца от количества поглощенных лазерных импульсов. Семейство кривых (1) для плотностей энергии больше 8 Дж/см², семейство кривых (2) для плотностей энергии меньше 8 Дж/см². Диапазоны изменения плотностей энергии импульсов, указаны справа от кривых. Исходная масса порции топлива во всех проведенных экспериментах составляла $m_0 \sim 150$ мг.

нием содержания воды в составе исходной порции топлива;

– газификации угля с образованием синтез-газа, преимущественно состоящего из оксида углерода (СО).

Оба процесса ведут к снижению массы образца топлива и соответствующему росту массы газоаэрозольной смеси вокруг исходной капли ВУС. На рис. 4 показана зависимость массы газоаэрозольной топливной смеси, выбитой лазерными импульсами из капли, от количества поглощенных импульсов. В зависимости от интенсивности лазерных импульсов кривые очевидно разделяются на два семейства. Нижняя заштрихованная область графика описывает зависимости массы тонкораспыленного ВУС, когда интенсивность лазерного излучения находится в пределах 3.2–7.9 Дж/см². Учитывая ранее представленные данные о зависимости состава атмосферы внутри камеры газификации от плотности энергии лазерных импульсов, можно заключить, что это семейство кривых описывает доминирующий процесс генерации тонкораспыленного водоугольного аэрозоля. При превышении ранее описанного порогового значения интенсивности (8 Дж/см²) происходит резкий скачок массы атомизированного топлива, который может быть однозначно объяснен включением процесса газификации угля.

Верхнее семейство кривых соответствует интенсивностям лазерных импульсов с 9.3 до 17.1 Дж/см². С увеличением плотности подводимого потока энергии растет скорость производства аэрозоля, однако зазор между семействами кривых позволяет довольно точно оценить вклад процесса газификации. Согласно приведенным на рис. 4 зависимостям, около четверти массы, потерянной каплей ВУС, превращается именно в синтез-газ.

Из рис. 4 также следует, что последовательное воздействие лазерных импульсов на каплю ВУС демонстрирует немонотонный характер. Видно, что скорость изменения массы выбитого из капли вещества замедляется после поглощения 50–60 импульсов для низких интенсивностей излучения (излом на графике). Для высоких интенсивностей скорость падает раньше (после 30–50 поглощенных импульсов). Данное замедление скорости атомизации топлива связано с тем, что каждый попавший импульс приводит к выбиванию капель слабосвязанной с угольными частицами воды из суспензии, а также к ее испарению при повышении температуры. Таким образом, после поглощения 30–60 импульсов топливная суспензия становится достаточно сухой, остается только вода, связанная в порах угольных частиц, чтобы дальнейшее поглощение импульсов не приводило к доминированию водяного пара (аэрозоля) в составе газо-аэрозольной смеси.

Данный факт позволяет сделать заключение, что принятое соотношение масс воды и угольного порошка в составе ВУС не является оптимальным для выбранного процесса переработки. В последующих исследованиях необходимо снижать водонаполнение топливной смеси, оптимизируя соотношение массы продуктов газификации и энергозатрат на ее проведение.

Согласно приведенным данным, эффективность процессов лазерной газификации растет с увеличением интенсивности лазерных импульсов. Однако видно, что соотношение концентраций горючих компонентов синтез-газа (СО и Н₂) и вредоносных примесей (SO₂ и NO_x) имеет достаточно сложную зависимость от интенсивности, поэтому, выбирая нужную рабочую интенсивность, можно подбирать соответствующий рабочий режим, когда производство вредных примесей минимизировано.

Скорость газификации показывает достаточно монотонный рост с увеличением интенсивности, что приводит к требованию организации рабочего процесса на максимально высоких плотностях энергий светового потока.

Исходя из [5, 6], присутствие воды — необходимый фактор для реализации традиционных методов газификации углеводородных твердых и композиционных жидких топлив. Водяной пар

наряду с синтез-газом выступает в качестве агента, доставляющего тепло к частицам угля. Однако в случае адресной доставки тепла к топливу в виде мощного светового потока потребность в присутствии воды снижается.

Как показано в [22, 23], при светоиндуцированной газификации водоугольных смесей диоксид углерода не образуется, что является несомненным преимуществом данного метода газификации. Однако эта особенность также связана с высоким содержанием воды в составе исходной топливной смеси, которая препятствует быстрому нарастанию температуры на поверхности частиц угля и их последующему возгоранию. С другой стороны, воздействие мощных лазерных импульсов на *сухие* угольные порошки приводит к быстрому диспергированию порции топлива без существенной его газификации, а значит, наличие воды в составе исходного топлива — необходимое условие успешной газификации под действием световых импульсов.

Учитывая описанные особенности процессов, протекающих при воздействии мощных лазерных импульсов на водоугольную суспензию, можно предположить, возможный путь практического использования техники лазерной атомизации ВУС. Пропуская поток капель ВУС, созданный обычной форсункой грубого распыления, через область фокусировки мощных пучков, созданных импульсными лазерами, можно сформировать существенное количество тонкораспыленных фракций в составе потока капель ВУС. Данная газо-аэрозольная смесь позволит существенно упростить зажигание ВУС, снижая задержки зажигания и потребные температуры в топке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе показаны основные особенности процессов конверсии водоугольной топливной смеси, полученной из отходов углеобогащения, под действием мощных лазерных импульсов. Воздействие мощных лазерных импульсов на ВУС приводит к формированию топливного аэрозоля (если интенсивность ниже порога газификации) и производству газо-аэрозольной топливной смеси в соотношении 1:3 (синтез-газ / аэрозоль). Рост интенсивности лазерных импульсов ведет к росту скорости, как газификации, так и генерации тонкораспыленного топливного аэрозоля. Концентрации различных компонентов синтез-газа зависят от плотности энергии (интенсивности) лазерных импульсов. Концентрации водорода и диоксида серы в составе синтез-газа квази-линейно растут с ростом интенсивности импульсов. Концентрации оксида углерода и оксидов азота достигают существенных величин после превышения порогового значения интенсивности импульсов (8 Дж/см²).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации. Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/435>
2. Плакиткин Ю.А., Плакиткина Л.С., Дьяченко К.И. // Уголь. 2016. № 7. С. 12.
3. Программа развития угольной промышленности России на период до 2030 года. Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/433>
4. Панишев Н.В., Бигеев В.А., Галиулина Е.С. // Теория и технология металлургического производства. 2015. № 2 (17). С. 69.
5. Glushkov D.O., Lyrschikov S.Yu., Shevyrev S.A., Strizhak P.A. // Energy & Fuels. 2016. V. 30. № 4. P. 3441.
6. Iegorov R.I., Strizhak P.A., Chernetskiy M.Yu. // EPJ Web of Conferences. 2016. V. 110. P. 1.
7. Лиштван И.И., Фалюшин П.Л., Смолячкова Е.А., Коврик С.И. // ХТТ. 2009. № 1. С. 3.
8. Lior N. // Energy. 2008. V. 33. № 6. P. 842.
9. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Зажигание органоводоугольных топливных композиций. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 460 с.
10. Исламов С.Р. // Уголь. 2017. № 4. С. 50.
11. Глушков Д.О., Стрижак П.А., Чернецкий М.Ю. // Теплоэнергетика. 2016. № 10. С. 31.
12. Исламов С.Р., Кочетков В.Н., Степанов С.Г. // Уголь. 2006. № 8. С. 69.
13. Ходаков Г.С. // Теплоэнергетика. 2007. № 1. С. 35.
14. Bosmans A., Helsen L. Energy from waste: review of thermochemical technologies for refuse derived fuel (RDF) treatment // Proc. Venice 2010, Third Int. Sympos. on Energy from Biomass and Waste. 2010.
15. Mishra S.K., Senapati P.K., Panda D. // Energy Sources. 2002. V. 24. № 2. P. 159.
16. Anghony D.B., Howard J.B. // AIChE J. 1976. V. 22. № 4. P. 625.
17. Вершинина К.Ю., Глушков Д.О., Стрижак П.А. // ХТТ. 2017. № 3. С. 63.
18. Dmitrienko M.A., Nyashina G.S., Strizhak P.A. // J. Hazard. Mater. 2017. V. 338. P. 148.
19. Körner C., Mayerhofer R., Hartmann M., Bergmann H.W. // App. Phys. A: Mater. Sci. and Proc. 1996. V. 63. № 2. P. 123.
20. Chichkov B.N., Momma C., Nolte S., Von Alvensleben F., Tünnermann A. // App. Phys. A: Mater. Sci. and Proc. 1996. V. 63. № 2. P. 109.
21. Murastov G., Tsipilev V., Ovchinnikov V., Yakovlev A. // J. Phys.: Conf. Series. 2017. V. 830.
22. Egorov R.I., Strizhak P.A. // Fuel. 2017. V. 197. P. 28.
23. Zaitsev A.S., Egorov R.I., Strizhak P.A. // Fuel. 2018. V. 212. P. 347.