

6. Марчук, М. А. Обобщенная точность систем обработки экспериментальных данных [Текст] / М. А. Марчук, И. В. Мирошниченко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. — 2012. — № 8(179), Ч. 2. — С. 121–130.
7. Детлинг, В. С. Выбор вида адаптации в информационных системах [Текст] : сб. докл. / В. С. Детлинг, И. В. Мирошниченко // V Международная научно-техн. конф. «Гиротехнологии, навигация и управление движением», Киев, 21–22 апреля 2005 г. — С. 310–313.
8. Детлинг, В. С. Вибір параметрів адаптивних систем обробки експериментальних даних [Текст] / В. С. Детлинг, І. В. Мірошніченко, В. І. Павленко, В. О. Тихоход // Адаптивні системи автоматичного управління. — 2012. — Вип. 20(40). — С. 41–51.
9. Мирошниченко, И. В. Погрешности от неидеальности оператора сравнения статистических информационно-измерительных систем [Текст] : сб. доп. / И. В. Мирошниченко // VIII Міжнародна науково-техн. конф. «Гиротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки», 21–22 квітня 2011 р., Київ. — Ч. 4. — С. 100–104.
10. Тихонов, В. И. Выбросы траекторий случайных процессов [Текст] / В. И. Тихонов, В. И. Хиленко. — М.: Наука, 1987. — 303 с.
11. Черепашук, Г. А. Особенности метрологической аттестации программного обеспечения систем для динамических измерений [Текст] : материалы междунар. научно-техн. конф. / Г. А. Черепашук // Автоматизация: Проблемы, идеи, решения. — Севастополь, 2012. — С. 180–181.
12. Мирошниченко, И. В. Об одном способе классификации статистических измерительных задач [Текст]: сб. наук. пр. / И. В. Мирошниченко // Математичне та комп'ютерне моделювання. — 2012. — Вип. 7. — С. 132–139.
13. Пономаренко, В. К. Повышение точности вычисления моментов высоких порядков случайных процессов с ограниченным диапазоном значений [Текст] / В. К. Пономаренко, В. С. Мирошниченко // Труды IV Всесоюзной Школы-семинара по статистической гидроакустике. — Новосибирск, 1973. — С. 123–128.
14. Цветков, Э. И. Основы теории статистических измерений [Текст] / Э. И. Цветков // 2-е изд., перераб. и дополн. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 286 с.
15. Detling, V. S. Information-logical model error of random statistical characteristics measurements [Текст] / V. S. Detling, C. Kartunov, I. V. Miroshnichenko // International scientific conference, Gabrovo, 23–24 Nov. 2007. — P. 322–327.

ФОРМУВАННЯ МОДЕЛІ ХВИЛЯСТОСТІ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ОБЧИСЛЕННЯ ШОРСТКОСТІ ПРОТЯЖНИХ ВИРОБІВ

У роботі описано використання інтегрованого інформаційного середовища, яке характеризується урахуванням сукупності показників точності вимірювань і метрологічної надійності, що дозволяє скоротити терміни проектування систем обробки експериментальних даних. Адаптивні системи для обчислення статичних параметрів якості поверхні — шорсткості — дозволяють формування і динамічних параметрів — хвилястості, в режимі «онлайн» при виготовленні протяжних виробів авіаційно-космічного машинобудування.

Ключові слова: шорсткість, хвилястість, уніфікований канал вимірювання ординат профілю шорсткості.

Мирошниченко Іван Володимирович, старший преподаватель, кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів и систем, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина, e-mail: goodgod@ukr.net.

Мирошниченко Іван Володимирович, старший викладач, кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів та систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Miroshnichenko Ivan, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: goodgod@ukr.net

УДК 66.096.5

**Безносик Ю. А.,
Логвин В. А.,
Коринчук К. А.,
Киржнер Д. А.**

СЖИГАНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ КИПЯЩЕМ СЛОЕ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ВЫБРОСОВ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ

Перспективным методом сжигания низкокачественных высокозольных и низкокалорийных топлив с низким уровнем токсических веществ, является сжигание в низкотемпературном псевдоожигенном слое. В работе приведены результаты проведенных экспериментов на специальной лабораторной установке по сжиганию низкокачественных топлив в низкотемпературном кипящем слое. Проведено сравнение процесса сжигания различных видов низкокачественного топлива.

Ключевые слова: псевдоожигенный слой, уголь, торф, пеллеты, антрацитовый штыб, оксиды серы, оксиды азота.

1. Введение

Повышение цен на природный газ и государственные программы модернизации коммунальной теплоэнергетики, целью которых является снижение потребления природного газа от 30 до 50 % для систем теплоснабжения Украины [1, 2], побуждают предприятия к возможности

использования альтернативных местных видов топлива для выработки тепловой энергии.

Таковыми топливами могут быть низкокачественный уголь, сланцы, торф, отходы переработки угля и др. весины. Так, ежегодный объем образования отходов углеобогащения в Украине составляет около 5,5 млн. т. Детальная информация об использовании и образовании

отходов приведена, согласно данным государственной статистики Украины за 2009 г. [3], на рис. 1.

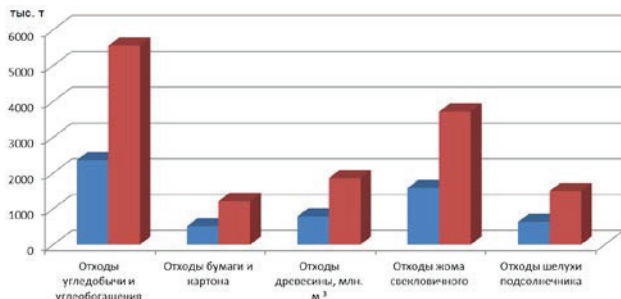


Рис. 1. Образование и использование отходов в Украине за 2009 год, тыс. т: ■ — использование отходов; ■ — образование отходов

Но переход с природного газа на уголь и другие твердые топлива, связан с увеличением уровня выбросов токсичных веществ. К тому же, согласно директиве ЕС 2001/80/ЕС, которую Украина и ЕС подписали в 2005 году, на начало 2018 г. Украина взяла на себя обязательства по уменьшению выбросов токсичных веществ, таких как диоксид серы в диапазоне 200–400 мг/м³ и оксиды азота в диапазоне 200–600 мг/м³ [4]. Кроме того, в Украине существует тенденция увеличения уровня выбросов загрязняющих веществ за счет стационарных источников (рис. 2) [3].

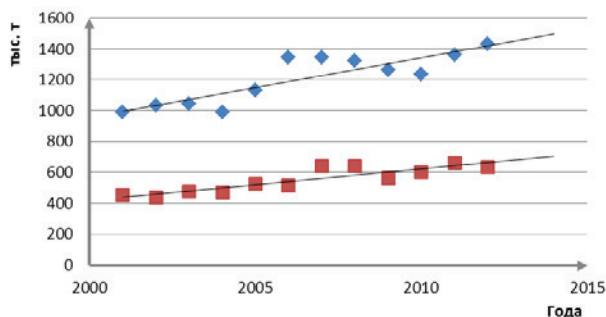


Рис. 2. Общие объемы выбросов диоксида серы и оксида азота в Украине (за счет стационарных источников: выбросы диоксида серы — 97 %, выбросы оксида азота — 52 %): ◆ — объемы выбросов диоксида серы; ■ — объемы выбросов диоксида азота

Одним из перспективных направлений решения этих проблемы является внедрение технологии сжигания твердого топлива в низкотемпературном кипящем слое (НТКС).

2. Постановка проблемы

Преимуществом сжигания угля в кипящем слое по сравнению с традиционным в энергетике шаровым сжиганием является возможность использования низкокачественных сортов топлив, а также снижение уровня выбросов загрязняющих веществ. Вместе с тем сжигание твердого топлива в низкотемпературном кипящем слое остается технологически сложным процессом и требует дополнительных исследований. Поэтому целью данной работы является определение температурных диапазонов, критических температур и концентраций выбросов оксидов серы и азота при сжигании в низкотемпературном кипящем слое следующих твердых топлив: бурого угля,

торфа, пеллет, отсева угля марки (Д), антрацитового штыба с определением образовавшихся при сжигании.

3. Анализ литературных данных

Топливом в кипящем слое может служить почти любой материал содержащий, углерод, водород и серу и т. д., но для эффективного сжигания, для избегания дорогостоящих отклонений от идеальных условий, которые часто встречаются на производствах, необходимо рассмотрение современных представлений о процессе горения для каждого вида топлива с разработкой соответствующих моделей горения [5]. Исследования в направлении сжигания твердых топлив в кипящем слое сегодня являются актуальными как в странах СНГ так в странах ЕС. Проблемами сжигания пеллет в кипящем слое занимается Магдебургский технический университет (Германия) [6], моделированием кипящего слоя в котлах Чалмерский технологический университет (Швеция) [7].

В связи с увеличением экологических проблем и для ограничения выбросов парниковых газов в ЕС при выработке тепловой энергии активно ведутся исследования по сжиганию биомассы в кипящем слое [8].

Удорожание стоимости твердого топлива требует его уменьшения в процессах сгорания. Для уменьшения потребления проводятся исследования по оптимизации процесса сжигания и определение оптимальных условий горения [9].

Для определения выбросов NO и N₂O при сжигании щепы в кипящем слое применяются компьютерные моделирующие программы [10]. Также ведутся исследования в направлении формирования и сокращения выбросов оксидов азота при сжигании в кипящем слое [11]. Проводились исследования по измерению выбросов NO и N₂O при сжигании шести типов углей, от лигнита до антрацита, в результате которого было выявлена зависимость преобразования топливного азота в выбросах от фракционного состава угля. При температурах от 1000 до 1300 К практически весь топливный азот превращался в NO и N₂O [12]. Результаты сравнения влияния различных рабочих параметров (температуры, избыток воздуха, добавление кальция, содержание влаги) при моделировании газообразных загрязняющих веществ (CO, NO, N₂O, SO₂, HCl) во время сжигания твердых бытовых отходов в циркулирующем кипящем слое, с экспериментальными данными при измерениях на опытной установке с диаметром 10 см и высотой 4 м, показали хорошую сходимость данных [13].

При переходе коммунальными предприятиями ЕС на сжигание топлив в кипящем слое от пылеугольного сжигания, с уменьшением выбросов SO_x/NO_x, было замечено увеличение выбросов N₂O, что связано с более низкой температурой горения. Показано, что выбросы N₂O зависят от вида топлива, температуры воздуха и избыточного уровня воздуха. Так исходя из текущих измерений при нормальных условиях эксплуатации, при сжигании древесин, торфа и лигнина, в среднем выбросы N₂O в пределах от 15–50 ppm, при сжигании углей — 40–200 ppm. Показана зависимость уменьшения выбросов N₂O при увеличении температуры или уменьшения избыточного уровня воздуха [14].

Проведенный анализ существующих открытых литературных источников показывает следующее: недостаточно исследован температурный диапазон работы

топок с НТКШ для различных марок украинских топлив, не определены критические температуры, при которых необходимо добавлять топливо в топку кипящего слоя, существует необходимость в дополнительных исследованиях для определения концентраций выбросов вредных веществ (NO_x , SO_2) в атмосферу при сжигании твердых топлив в кипящем слое [15–17].

4. Лабораторная база для проведения экспериментов

Для исследования процессов розжига низкокачественного угля в НТКШ использовалась огневая лабораторная установка для сжигания топлива в КШ, схема и фотография которой приведена на рис. 3.

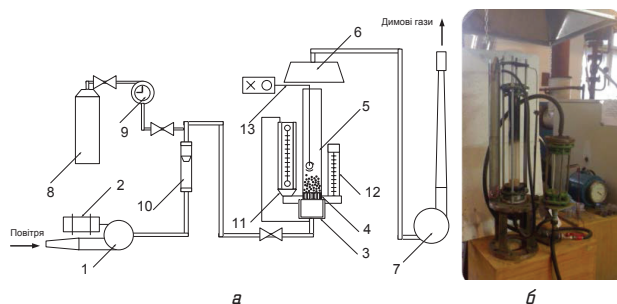


Рис. 3. Схема (а) и фотография (б) лабораторной установки: 1 — дутьевой вентилятор, 2 — регулятор мощности дутьевого вентилятора, 3 — камера смешивания, 4 — воздухораспределительная решетка, 5 — камера сгорания (кварцевая трубка), 6 — вентиляционный зонт, 7 — дымоход, 8 — газовый баллон (пропан — бутан), 9 — счетчик для измерения расхода газа, 10 — ротаметр для измерения расхода дутьевого воздуха, 11 — мановакууметр двухтрубный U-образный для измерения давления воздуха (газовой смеси) на входе в воздухораспределительную решетку, 12 — линейка для измерения высоты кипящего слоя, 13 — термопара для измерения температуры в камере сгорания

Технология работы установки заключается в следующем: дутьевой воздух с помощью дутьевого вентилятора (1) подается в камеру смешивания (3), смешивается с пропан — бутановой смесью (в случае разжигания за счет пропан — бутана), которая подается с газового баллона (8), проходит через воздухораспределительную решетку (4), диаметром отверстий 1 мм, и сжигает твердое топливо, находящееся в камере сгорания — кварцевой трубе (5) с $d = 59$ мм. Дымовые газы через вентиляционный зонт (6) выводятся вытяжным вентилятором (7). Регулирование расхода воздуха осуществляется за счет изменения оборотов дутьевого вентилятора с помощью регулятора мощности (2). Расход газа измеряется счетчиком газа (9). Для измерения расхода воздуха используется ротаметр РМ-25Г (10). Мановакууметром двухтрубным U-образным (11) измеряется давление перед воздухораспределительной решеткой. Температура измеряется с помощью термопар (13) установленных в камере сгорания. Для измерения высоты кипящего слоя используется линейка (12).

5. Твердые топлива для проведения исследований

Для проведения исследований по сжиганию топлив были выбраны следующие материалы: бурый уголь, торф, пеллеты (топливные брикеты из пиломатериалов), антрацитовый штыб (АШ), отсев угля марки Д (рис. 4). Характеристики перечисленных твердых топлив приведены в табл. 1.

В предыдущих статьях авторов были рассмотрены вопросы исследования различных способов розжига кипящего слоя низкокачественного твердого топлива в НТКШ, использования инертного материала для проведения исследований [15, 16]. Розжиг кипящего слоя проводился двумя методами с помощью бутан-пропановой смеси

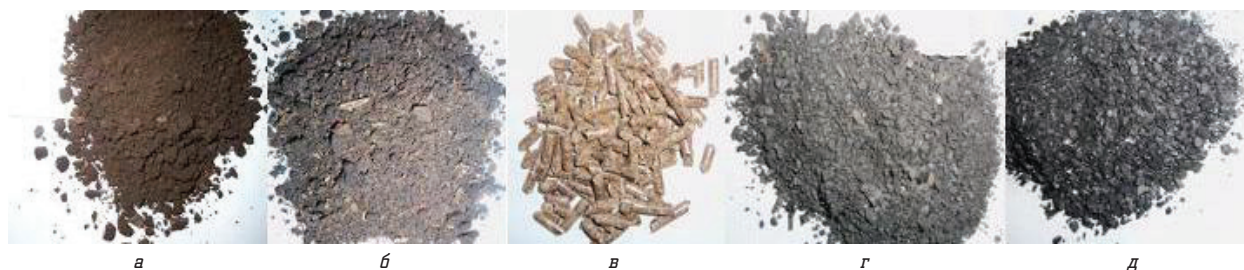


Рис. 4. Фотографии твердых топлив для проведения исследований: а — бурый уголь; б — торф; в — пеллеты; г — АШ; д — отсев угля марки Д

Таблица 1

Характеристики твердых топлив

| Название топлива | Марка топлива | Диаметр фракции, мм | Насыпная плотность, кг/м^3 | Реальная плотность, кг/м^3 | Пористость | Теплотворная способность, ккал/кг | Теплотворная способность, МДж/кг | Зольность, % | Влажность, % | Содержание серы, % | Содержимое летучих |
|--------------------|---|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------|--|---|--------------|--------------|--------------------|--------------------|
| Бурый уголь | БР-1 (рядовое) | 1—10 | 0,64 | 1,28 | 0,5 | 2056 | 8,61 | 16,95 | 55 | 1,9 | 18—20 |
| Торф | Низменный (тип), тростниково-осоковый (вид) | 1—10 | 0,4 | 0,85 | 0,53 | 1935—3583 | 8,1—15 | 16,8 | 50 | — | — |
| Пеллеты | Pellet B6 | 1—10 | 0,62 | 1,28 | 0,52 | 4109 | 17,2 | 0,35 | 8 | — | — |
| Антрацитовый штыб | АШ | 2—5 | 0,89 | 1,55 | 0,43 | 5400 | 22,61 | 16,82 | 11,6 | 2 | 6 |
| Отсев угля марки Д | Д | 1—2 | 0,89 | 1,35 | 0,34 | 5500 | 23,03 | 10,8 | 13,8 | 0,6 | 38 |

и древесного угля. Исследовалась зависимость сопротивления решетки и кипящего слоя от скорости воздуха для различных фракций видов твердого топлива.

6. Определения температурных режимов горения топлив

Для определения температурных режимов горения топлив на лабораторной установке проводились эксперименты по схеме: засыпался инертный материал в камеру горения, и разогревался до необходимой температуры, после чего периодически подавалось порционно топливо.

Проведенный ряд опытов показывает, что после подачи бурого угля в топку (при температуре разогретого инертного материала — 890 К) происходит снижение температуры до 850 К, в следствии охлаждения слоя балластом в виде топлива с температурой 288 К, после нагрева частиц топлива начинают выделяются летучие вещества (в буром угле до 20 % летучих веществ), которые горят над слоем, и частички топлива начинают гореть (рис. 5). Температура повышается до 890 К, после чего снова снижается до 880 К, при которой необходимо провести повторную засыпку топлива для недопущения затухания. При сжигании бурого угля скорость воздуха составляла 0,59 м/с, диаметр частиц — от 1 до 10 мм. Оптимальное соотношение навески топлива к инертному материалу составило 1:14. Расход бурого угля составил 1,1 кг/час.

Температурный диапазон горения торфа меньше бурого угля в среднем на 60 К, что связано с большим содержанием летучих веществ и менее вязкой структурой. Резкое снижение температуры слоя от 830 до 760 К, связано с большим содержанием влаги в торфе (до 50 %). После испарения влаги, начинают вы-

деляться летучие вещества, которые горят над слоем, и частички топлива начинают гореть (рис. 6), при этом температура повышается до 840 К, после чего снова снижается до 830 К, при которой необходимо провести повторную засыпку топлива для недопущения затухания. При сжигании торфа скорость воздуха составляла 0,59 м/с, диаметр частиц — от 1 до 10 мм. Оптимальное соотношение навески топлива к инертному материалу составило 1:14. Расход бурого угля составил 0,8 кг/час.

Особенностью сжигания пеллет в КС является процесс газификации горючих летучих веществ и горение их над слоем инертного материала и топлива. При подаче пеллет в топку (при температуре разогретого инертного материала 900 К) происходит снижение температуры до 870 К, после чего начинают выделяться летучие вещества, в том числе окиси углерода, водорода и метана, которые горят над слоем (рис. 7). До 80 % тепловой энергии, высвобождающейся при сжигании пеллет, происходит именно на стадии горения летучих веществ. При сжигании пеллет скорость воздуха составляла 0,59 м/с, диаметр частиц 6 мм. Оптимальное соотношение навески топлива к инертному материалу составило 1:14. Расход пеллет составил 0,7 кг/час.

Сжигание АШ характеризуется наиболее узким диапазоном регулирования температуры от 1130 до 1150 К, так как АШ имеет гораздо меньшее количества летучих горючих, и требует непрерывной подачи топлива (рис. 8). При разовой подаче топлива по массе больше соотношения 1:70 (топливо : инертный материал), происходит падение температуры ниже 1130 К и соответственное захлаживание слоя. В ходе ряда экспериментов, было определено, что критическая температура при которой необходимо добавлять топливо — 1140 К. При сжигании АШ скорость воз-

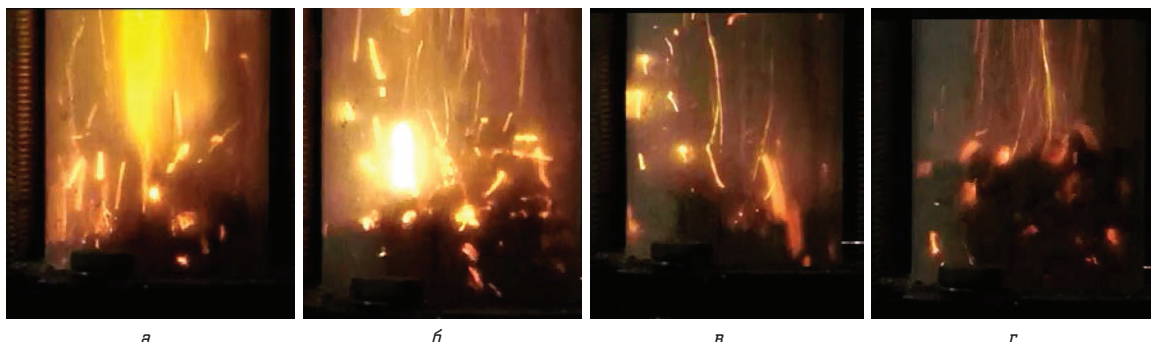


Рис. 5. Выделение летучих и горение частиц бурого угля с диаметром от 1—10 мм в кипящем слое: а — $T = 870$ К; б — $T = 890$ К; в — $T = 880$ К; г — $T = 850$ К

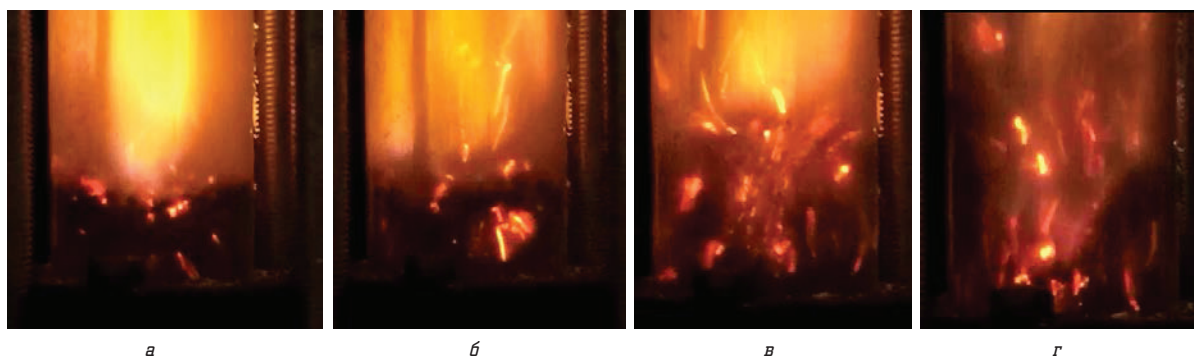


Рис. 6. Выделение летучих и горение частиц торфа с диаметром от 1—10 мм в кипящем слое: а — $T = 790$ К; б — $T = 820$ К; в — $T = 840$ К; г — $T = 760$ К

духа составляла 0,59 м/с, диаметр частиц — от 1 до 5 мм. Оптимальное соотношение навески топлива к инертному материалу составило 1:140. Расход АШ составил 0,3 кг/час.

При подаче отсева угля марки Д в топку (при температуре разогретого инертного материала 1130 К) происходит снижение температуры до 1090 К, после чего начинают выделяться летучие вещества (в отсеке угля марки Д, который относится к газовым углям, содержание летучих составляет до 38 %) и частички топлива начинают гореть (рис. 9). Температура повышается до 1130 К, после чего снова снижается до 1120 К, при которой необходимо провести повторную засыпку топлива для недопущения затухания. При сжигании отсева угля марки Д скорость воздуха составляла 0,63 м/с, диаметр частиц — от 1 до 5 мм. Оптимальное соотношение навески топлива к инертному материалу составило 1:28. Расход отсева угля марки Д составил 0,5 кг/час.

На рис. 10 приведены температурные режимы сжигания топлив, которые свидетельствуют, что стабильное

горение пеллет, торфа и бурого угля имеет более низкую температуру горения, чем отсев угля марки Д и АШ за счет более вязкой структуры.

Образование выбросов токсических веществ в топках с кипящим слоем. Уровень температур в зоне горения от 760 до 1140 К позволяет рассматривать топки с кипящим слоем как одно из средств снижения выбросов оксидов азота, так при данных температурах практически отсутствуют термические оксиды азота. Кроме того при сжигании топлива в кипящем слое создаются условия для восстановления оксида азота до безвредного молекулярного азота.

В топках кипящего слоя имеется возможность снижения выбросов сернистого ангидрида путем связывания серы топлива адсорбентом, подаваемым вместе с топливом [18, 19]. Определение выбросов токсических веществ проводился с помощью газоанализатора Testo 330-2LL. Результаты ряда опытов (от 5 и больше проб для одного вида топлива) по газовому анализу приведены в табл. 2.

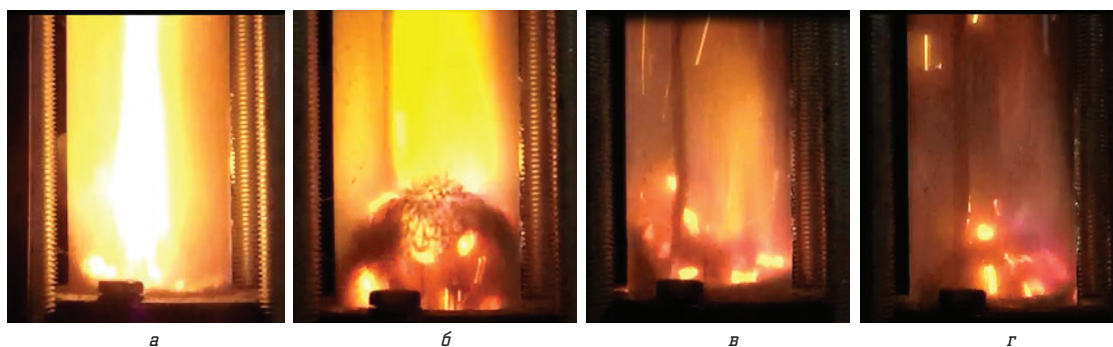


Рис. 7. Выделение летучих и горение частиц пеллет с диаметром от 1—10 мм в кипящем слое: а — $T = 890$ К; б — $T = 910$ К; в — $T = 870$ К; г — $T = 830$ К

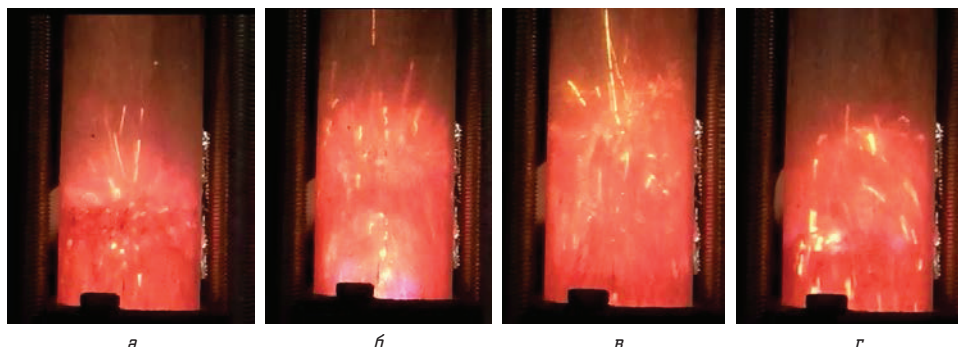


Рис. 8. Горение частиц АШ с диаметром от 1—5 мм в кипящем слое: а — $T = 1140$ К; б — $T = 1150$ К; в — $T = 1140$ К; г — $T = 1130$ К

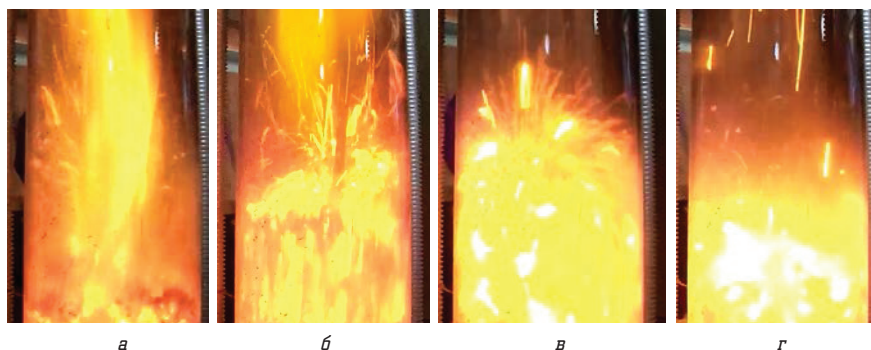


Рис. 9. Выделение летучих и горение частиц угля Д с диаметром от 1—5 мм в кипящем слое: а — $T = 1090$ К; б — $T = 1110$ К; в — $T = 1120$ К; г — $T = 1130$ К

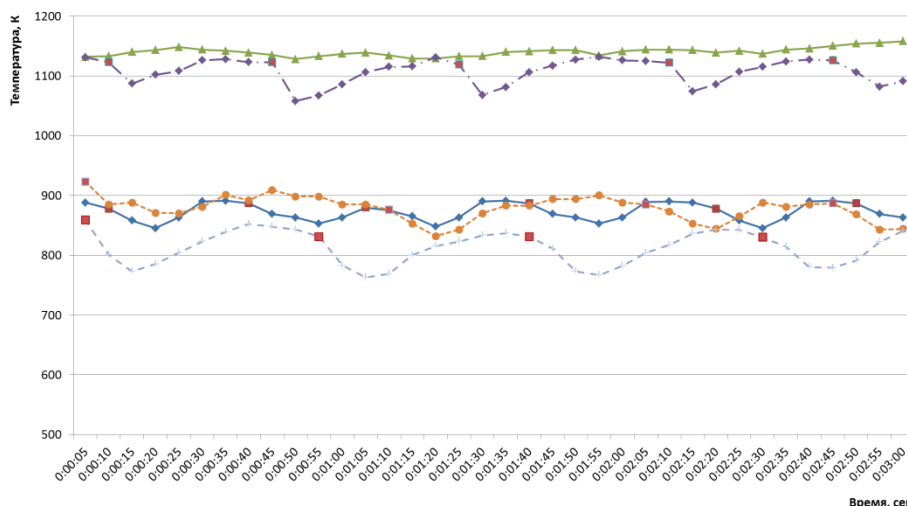


Рис. 10. Зависимость температуры от времени сжигания твердых топлив, включая: — бурый уголь; — АШ; — уголь Д; — пеллеты; — торф

Результаты газового анализа

| Название | Выбросы CO, ppm | Выбросы NO _x , ppm | Выбросы SO ₂ *, мг/м ³ |
|--------------------|-----------------|-------------------------------|--|
| Бурый уголь | 750 | 270 | — |
| Торф | 700 | 250 | — |
| Пеллеты | 490 | 100 | — |
| АШ | 1000 | 350 | 30—40 |
| Отсев угля марки Д | 590 | 290 | 60—80 |

Примечание: * — концентрация выбросов SO₂ определена аналитическим путем

Результаты газового анализа показывают, что при сжигании твердых топлив в НТКС, наибольшие выбросы оксидов азота происходят при сжигании антрацитового штыба — 350 ppm. Наиболее экологически безопасным топливом, среди ряда исследованных твердых топлив, является пеллеты — 100 ppm. Отсев угля марки Д, бурый уголь и торф характеризуются близким уровнем выбросов оксидов азота и оксида углерода.

7. Выводы

В ходе экспериментальных исследований были получены следующие результаты:

1. Определены оптимальные температурные диапазоны сжигания твердого топлива в низкотемпературном кипящем слое. Для антрацитового штыба он определяется в интервале температур 1133–1150 К, для отсева угля марки Д 1070–1130 К, для пеллет 830–910 К, для бурого угля 840–890 К, для торфа 770–850 К.

2. Определены критические температуры при которых необходимо добавлять топливо, для антрацитового штыба — 1143 К, для отсева угля марки Д — 1120 К, для пеллет — 870 К, для бурого угля — 880 К, для торфа — 830 К.

3. Полученные результаты можно использовать для настройки автоматики, регулирующей работу топок с КС работающих на низкокачественных топливах, для реконструкции и модернизации существующих котлов

Таблица 2

с целью их перевода на низкокачественные топлива с уменьшением уровня выбросов загрязняющих веществ.

Литература

1. Про затвердження Програми модернізації систем теплопостачання на 2014–2015 роки [Електронний ресурс]: Постанова від 17 жовтня 2013 р. № 948 / Кабінет Міністрів України. — Режим доступу: \www/URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/948-2013-p>
2. Про затвердження Державної цільової економічної програми модернізації комунальної теплоенергетики на 2010–2014 роки [Електронний ресурс]: Постанова від 4 листопада 2009 р. № 1216 / Кабінет Міністрів України. — Режим доступу: \www/URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1216-2009-p>
3. Державна служба статистики України [Електронний ресурс]. — Режим доступу: \www/URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/>
4. Директива № 2001/80/ЕС Європейського Парламенту і Ради «Об ограничении выбросов некоторых загрязняющих веществ крупных установок сжигания» [Электронный ресурс]. — Люксембург, 23 октября 2001 года. — Режим доступа: \www/URL: http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/994_913
5. Anthony, E. J. Fluidized bed combustion of alternative solid fuels; status, successes and problems of the technology [Text] / E. J. Anthony // Progress in Energy and Combustion Science. — 1995. — V. 21, № 3. — P. 239–268.
6. Uhlemann, H. Wirbelschicht-Sprühgranulation [Text] / H. Uhlemann, L. Mörl. — Springer-Verlag, Berlin, 2000. — 509 p.
7. Johansson, M. Dynamic model of a bubbling fluidized bed boiler [Text] / M. Johansson // Master's Thesis in the Innovative and Sustainable Chemical Engineering, Göteborg, Sweden, 2012. — 64 p.
8. Khana, A. A. Biomass combustion in fluidized bed boilers [Text] / A. A. Khana, W. de Jonga, P. J. Janssens, H. Spliethoff // Potential problems and remedies. — 2009. — V. 90, № 1. — P. 21–50.
9. Basu, P. Combustion of coal circulating fluidized-bed boilers: a review [Text] / P. Basu // Chemical Engineering Science. — 1999. — V. 54, № 22. — P. 5547–5557.
10. Hao Liu. Modelling of NO and N₂O emissions from biomass-fired circulating fluidized bed combustors [Text] / Liu Hao, M. Bernard // Fuel. — 2002. — V. 81, № 3. — P. 271–280.
11. Johansson, J. E. Formation and reduction of nitrogen oxides in fluidized-bed combustion [Text] / Jan E. Johansson // Fuel. — 1994. — V. 73, № 9. — P. 1398–1415.
12. Pels, J. R. Rank dependence of N₂O emission in fluidized-bed combustion of coal [Text] / Jan R. Pels, Marek A. Wójtowicz, Jacob A. Moulijn // Fuel. — 1993. — V. 72, № 3. — P. 373–379.
13. Desroches-Ducarne, E. Modelling of gaseous pollutants emissions in circulating fluidized bed combustion of municipal refuse [Text] / Estelle Desroches-Ducarne, J. Christophe Dolignierb, Eric Martyb, Gérard Martinb, Lucien Delfosse // Fuel. — 1998. — V. 77, № 13. — P. 1399–1410.

14. Mann, M. D. Nitrous oxide emissions in fluidized-bed combustion: Fundamental chemistry and combustion testing [Text] / Michael D. Mann, Michael E. Collings, Peter E. Botros // Progress in Energy and Combustion Science. — 1992. — V. 18, № 5. — P. 447–461.
15. Безносик, Ю. О. Дослідження процесів спалення низькоякісного вугілля у низькотемпературному киплячому шарі [Текст] / Ю. О. Безносик, В. О. Логвин, К. О. Корінчук // Технологічний аудит і резерви виробництва. — 2013. — № 2/1(10). — С. 8–11.
16. Логвин, В. О. Дослідження способів розпалювання низькоякісного вугілля у низькотемпературному киплячому шарі [Текст] / В. О. Логвин, Ю. О. Безносик, К. О. Корінчук, Д. А. Кіржнер // Технологічний аудит і резерви виробництва. — 2013. — № 3/1(11). — С. 28–31.
17. Кучин, Г. П. Сжигание низкосортных топлив в псевдоожиженном слое [Текст] / Г. П. Кучин, В. Я. Скрипко, Н. Н. Урда. — М.: Техника, 1987. — 144 с.
18. Bugaeva, L. N. An application of expert system to choice, simulation and development of gases purification processes [Text] / L. N. Bugaeva, Yu. A. Beznosik, G. A. Statjukha, A. A. Kvitka // Computers & Chemical Engineering. — 1996. — Vol. 20, Suppl. 1. — P. 401–402.
19. Beznosik, Y. An intelligent system for designing waste gas purification processes from nitrogen oxides [Text] / Y. Beznosik, L. Bugaeva, E. Kenig, A. Gorak, A. Kraslawski, I. Astrelin // 2-nd Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction (Proceedings of PRESS'99), Hungarian Chemical Society, May 31 — June 2, 1999, Budapest, Hungary. — 1999. — P. 169–174.

СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДОГО ПАЛИВА У НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОМУ КИПЛЯЧОМУ ШАРІ З ВИЗНАЧЕННЯМ ВИКИДІВ ТОКСИЧНИХ РЕЧОВИН

Перспективним методом спалювання низькоякісних високозольних і низькокалорійних палив з низьким рівнем токсичних речовин, є спалювання в низькотемпературному псевдозрідженому шарі. У роботі наведені результати проведених експериментів на спеціальній лабораторній установці зі спалювання низькоякісних палив в низькотемпературному киплячому шарі. Проведено порівняння процесу спалювання різних видів низькоякісного палива.

Ключові слова: псевдозріджений шар, вугілля, торф, пелети, антрацитовий штиб, оксиди сірки, оксиди азоту.

Безносик Юрій Александрович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, **e-mail:** yu_beznosyk@ukr.net.

Логвин Валерій Александрович, аспірант, кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, **e-mail:** logvyn_valerii@mail.ru.

Корінчук Катерина Алексеевна, аспірант, відділ теплофізических процесів в котлах, Інститут технічної теплофізики НАНУ, Київ, Україна, **e-mail:** engecology@gmail.com.

Кіржнер Дмитрій Авраамович, інженер, відділ теплофізических процесів в котлах, Інститут технічної теплофізики НАНУ, Київ, Україна, **e-mail:** digecology@gmail.com.

Безносик Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Логвин Валерій Олександрович, аспірант, кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Корінчук Катерина Олексіївна, аспірант, відділ теплофізических процесів в котлах, Інститут технічної теплофізики НАНУ, Київ, Україна.

Кіржнер Дмитро Авраамович, інженер, відділ теплофізических процесів в котлах, Інститут технічної теплофізики НАНУ, Київ, Україна.

Beznosyk Yuriy, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, **e-mail:** yu_beznosyk@ukr.net.

Logvyn Valeriy, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, **e-mail:** logvyn_valerii@mail.ru.

Kotinchuk Kateryna, Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, **e-mail:** engecology@gmail.com.

Kirzhner Dmytro, Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, **e-mail:** digecology@gmail.com.

УДК 620.92(477)

**Лимаренко О. М.,
Халітова Л. А.**

ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ МЕТОДІВ УТИЛІЗАЦІЇ НАФТОВОГО ГАЗУ В УКРАЇНІ

У статті розглянуто нові технології утилізації попутного нафтового газу та переробки його в рідкі продукти. Встановлено причини неповної утилізації нафтового газу. Описано методи і засоби утилізації нафтового газу і зазначено перспективні напрямки їх розвитку. Розроблено критерії вибору ефективних методів утилізації нафтового газу та створення умов, що стимулюють реалізацію цих методів на родовищах.

Ключові слова: нафтовий попутний газ, газонафтохімія, смолоскипне спалювання, виробництво електричної енергії.

1. Вступ

Високі темпи світового економічного розвитку призводять до збільшення обсягів споживання мінерально-сировинних ресурсів. «За останні 35 років використано 80–85 % нафти і газу від загального їх обсягу, видобутого за весь історичний період» [1].

Нафтова промисловість становить основу сучасної економіки, в той же час вона є головним забруднювачем і руйнівником навколишнього середовища. Видобуток і транспортування нафти в нинішніх масштабах неминуче призводять до значних наслідків негативного впливу на навколишнє середовище.