

УДК 66.096.5

## СЖИГАНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Логвин В. А., Безносик Ю. А.,

## СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДОГО ПАЛИВА КИПЛЯЧОМУ ШАРІ

Логвин В. О., Безносик Ю. О., Афонін Г.Г.

## SOLID FUEL BURNING AT THE BOILING LAYER

Logvyn V., Beznosyk Yu., Afonin G.

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

[logvyn\\_valerii@ukr.net](mailto:logvyn_valerii@ukr.net)

*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, pellets, антрацитовый штыб, оксиды серы, оксиды азота*

*У роботі наведені результати проведених експериментів на спеціальній лабораторній установці зі спалювання низькоякісних палив в низкотемпературному киплячому шарі. Проведено порівняння процесу спалювання різних видів низькоякісного палива.*

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

*In the paper the results of the experiments conducted at the special laboratory-scale plant for burning low-quality fuels at the low-temperature boiling layer are given. The comparison of the process of burning different types of low-quality fuel has been conducted.*

*Keywords: fluidized bed, coal, peat, pellets, anthracite culm, sulfur oxide, nitrogen oxide*

### 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 древесины. Так, ежегодный объем образования отходов углеобогащения в Украине составляет около 5,5 млн. т.

Но переход с природного газа на уголь и другие твердые топлива, связан с увеличением уровня выбросов токсичных веществ. Кроме того, в Украине существует

тенденция увеличения уровня выбросов загрязняющих веществ за счет стационарных источников (рис. 1) [3].

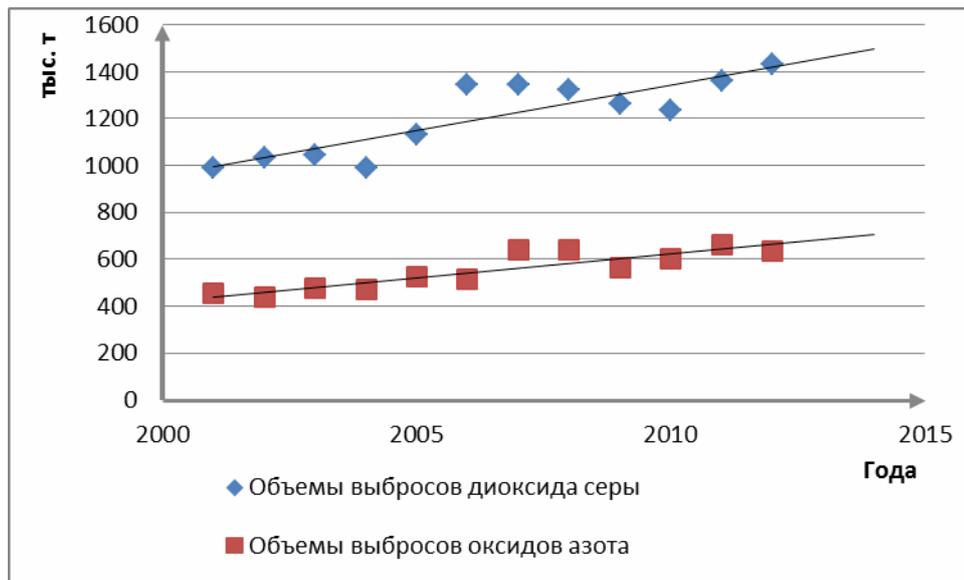


Рис. 1. Общие объемы выбросов диоксида серы и оксида азота в Украине (за счет стационарных источников: выбросы диоксида серы – 97%, выбросы оксида азота – 52%): ◆ - объемы выбросов диоксида серы; ■ - объемы выбросов диоксида азота

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 штыва 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 N<sub>2</sub>O 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 N<sub>2</sub>O 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 N<sub>2</sub>O [12]. Результаты сравнения влияния различных рабочих параметров (температуры, избыток воздуха, добавление кальция, содержание влаги) при моделировании газообразных загрязняющих веществ (CO, NO, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, 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<sub>x</sub> / NO<sub>x</sub>, было замечено увеличение выбросов N<sub>2</sub>O, что связано с более низкой температурой горения. Показано, что выбросы N<sub>2</sub>O 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 N<sub>2</sub>O в пределах от 15-50 ppm, при сжигании углей – 40-200 ppm. Показана зависимость уменьшения выбросов N<sub>2</sub>O при увеличении температуры или уменьшения избыточного уровня воздуха [14].

Проведенный анализ существующих открытых литературных источников показывает следующее: недостаточно исследован температурный диапазон работы топков 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<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>) 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 которой приведена на рис. 2.

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 розжига 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 зонтик (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).

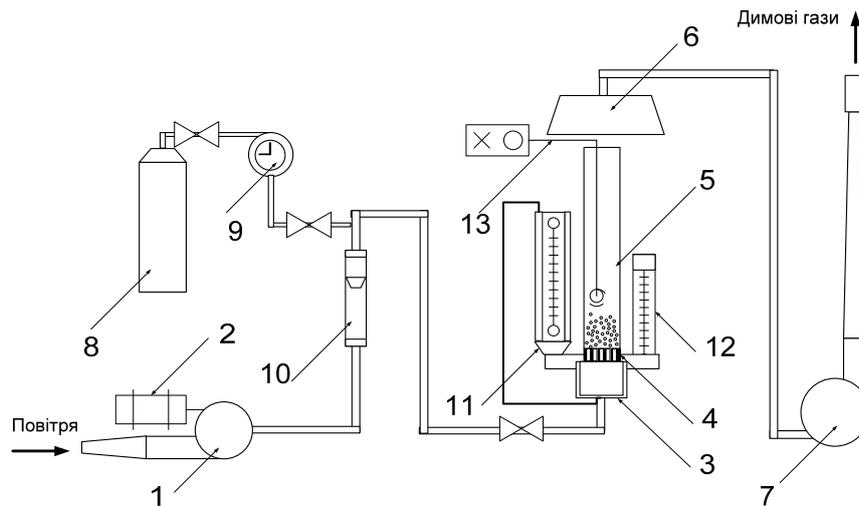


Рис. 2. Схема лабораторной установки:

1 – дутьевой вентилятор, 2 – регулятор мощности дутьевого вентилятора, 3 – камера смешивания, 4 – воздухораспределительная решетка, 5 – камера сгорания (кварцевая трубка), 6 – вентиляционный зонт, 7 – дымосос, 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

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. Характеристики перечисленных твердых топлив приведены в табл. 1.

В предыдущих статьях авторов были рассмотрены вопросы исследования различных способов розжиг 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 и древесного угля. Исследовалась зависимость сопротивления решетки и кипящего слоя от скорости воздуха для различных фракций видов твердого топлива.

## Характеристики твердых топлив

Название топлива	Марка топлива	Диаметр фракции, мм	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Реальная плотность, кг/м <sup>3</sup>	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

**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. 3). 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.

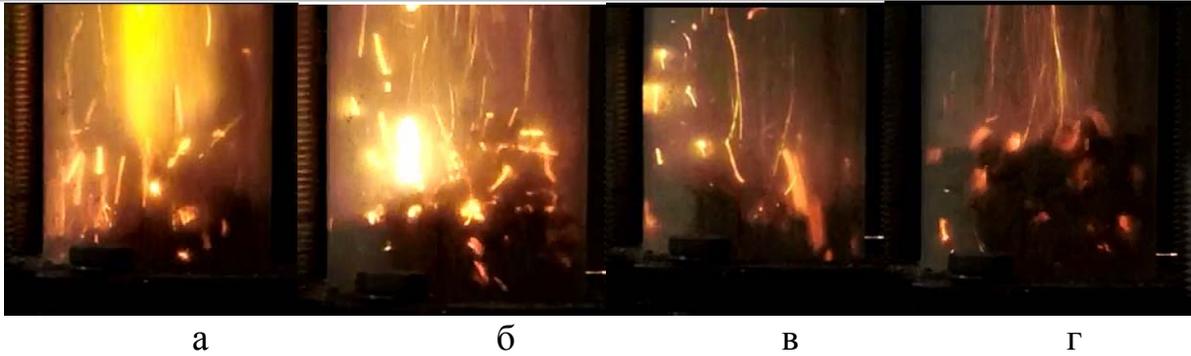


Рис. 3. Выделение летучих и горение частиц бурого угля с диаметром от 1-10 мм в кипящем слое: а -  $T=870$  К; б -  $T=890$  К; в -  $T=880$  К; г -  $T=850$  К

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 выделяются летучие вещества которые горят над слоем, и частички топлива начинает гореть (рис. 4), 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.

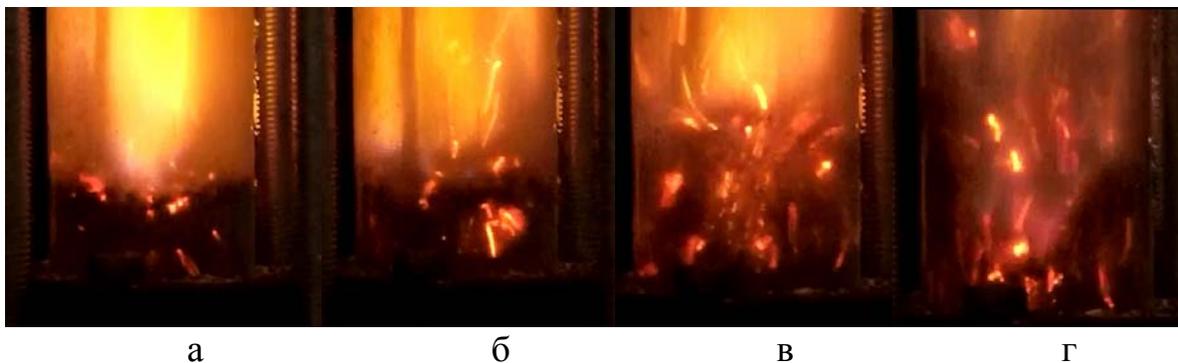


Рис. 4. Выделение летучих и горение частиц торфа с диаметром от 1-10 мм в кипящем слое: а -  $T=790$  К; б -  $T=820$  К; в -  $T=840$  К; г -  $T=760$  К

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 выделяются летучие вещества, в том числе окиси углерода, водорода и метана, которые горят над слоем (рис. 5). 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.

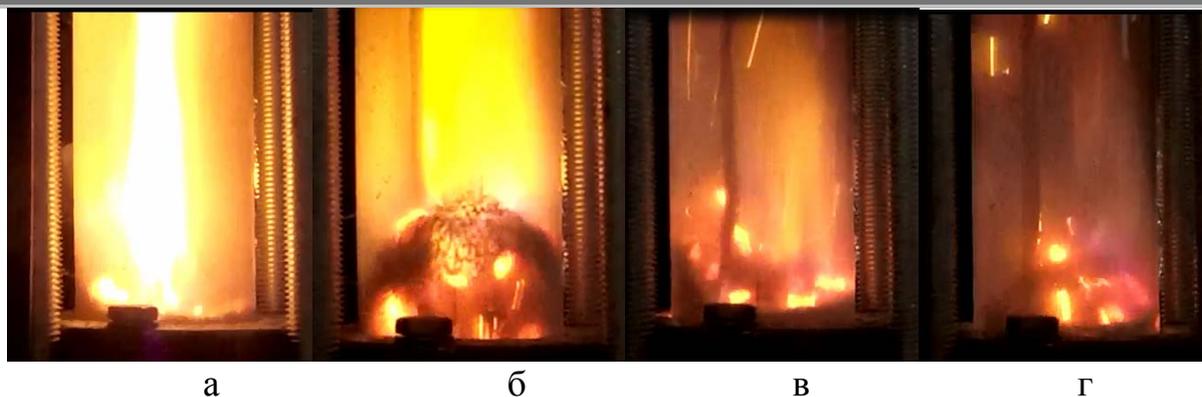


Рис. 5. Выделение летучих и горение частиц пеллет с диаметром от 1-10 мм в кипящем слое: а -  $T=890$  К; б -  $T=910$  К; в -  $T=870$  К; г -  $T=830$  К

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. 6). 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 воздуха 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.

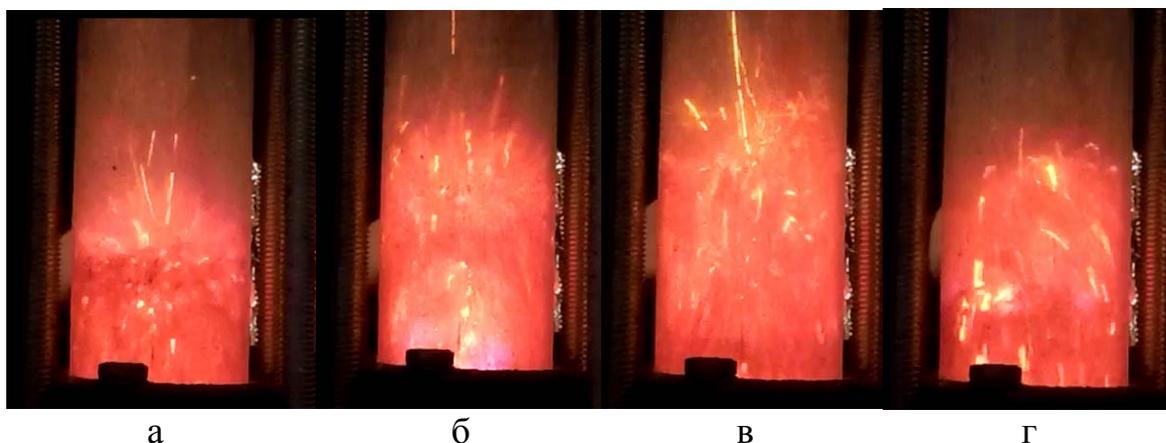
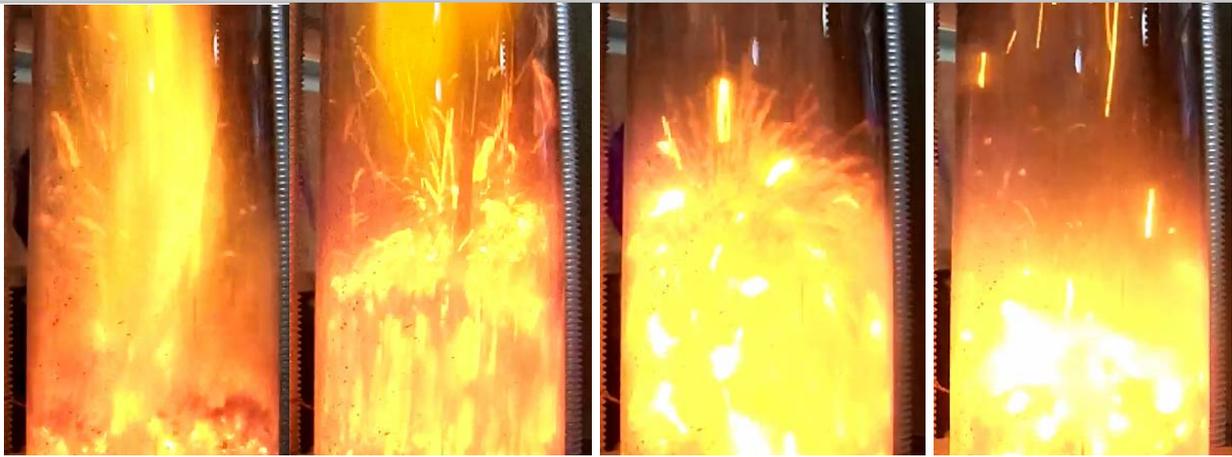


Рис. 6. Горение частиц АШ с диаметром от 1-5 мм в кипящем слое: а -  $T=1140$  К; б -  $T=1150$  К; в -  $T=1140$  К; г -  $T=1130$  К

При подаче отсева угля марки Д в топку (при температуре разогретого инертного материала 1130 К) происходит снижение температуры до 1090 К, после чего начинают выделяются летучие вещества (в отсева угля марки Д, который относится к газовым углям, содержание летучих составляет до 38 %) и частички топливо начинает гореть (рис. 7). 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.



а б в г

Рис. 7. 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

На рис. 8 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.

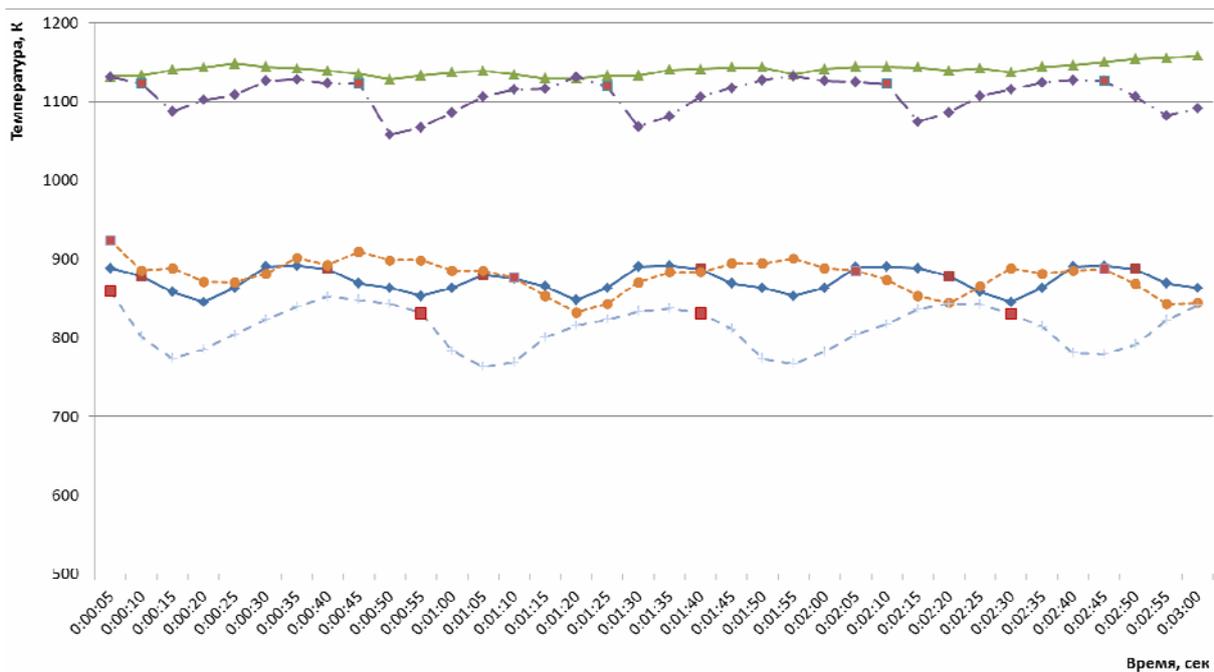


Рис. 8. Зависимость температуры от времени сжигания твердых топлив топлив, включая: —●— - бурый уголь; —▲— - АШ; —◆— - уголь Д; —○— - пеллеты; —+— - торф

**Образование выбросов токсических веществ в топках с кипящим слоем.**

Уровень температур в зоне горения от 760 до 1140 К позволяет рассматривать топку 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.

Таблица 2

Результаты газового анализа

Название	Выбросы CO, ppm	Выбросы NO <sub>x</sub> , ppm	Выбросы SO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>
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 SO<sub>2</sub> 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, 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 с целью их перевода на низкокачественные топлива с уменьшением уровня выбросов загрязняющих веществ.

### Литература

1. *Программа модернизации систем теплоснабжения на 2014-2015 годы*, утвержденная постановлением Кабинета Министров Украины от 17 октября 2013 № 948.
2. *Постанова Кабінету міністрів України № 1216 «Про затвердження Державної цільової економічної програми модернізації комунальної теплоенергетики на 2010-2014 роки»*.
3. *Государственная служба статистики Украины* // <http://www.ukrstat.gov.ua/>
4. *Директива № 2001/80/ЕС Европейского Парламента и Совета "Об ограничении выбросов некоторых загрязняющих воздух веществ крупных установок сжигания"*. – Люксембург, 23 октября 2001 года.
5. *Anthony, E.J. Fluidized bed combustion of alternative solid fuels; status, successes and problems of the technology [Текст] / E.J. Anthony // Progress in Energy and Combustion Science, 1995, V. 21, № 3 – P. 239-268.*

6. *Uhlemann, H.* Wirbelschicht-Sprühgranulation [Tekst] / H. Uhlemann, L. Mörl // Springer-Verlag, Berlin, 2000. – 509 p.
7. *Johansson M.* Dynamic model of a bubbling fluidized bed boiler [Tekst] / 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 [Tekst] / A.A. Khana, W. de Jonga, P.J. Jansensb, H. Spliethoffc // Potential problems and remedies, 2009, V. 90, № 1 – P. 21-50.
9. *Basu P.* Combustion of coalincirculating fluidized-bed boilers: a review [Tekst] / P. Basu // Chemical Engineering Science, 1999, V. 54, № 22 – P. 5547-5557.
10. *Hao Liu* Modelling of NO and N<sub>2</sub>O emissions from biomass-fired circulating fluidized bed combustors [Tekst] / Liu Hao, M. Bernard // Fuel, 2002, V. 81, № 3 – P. 271-280.
11. *Jan E.* Formation and reduction of nitrogen oxides in fluidized-bed combustion [Tekst] / E. Jan // Fuel, 1994, V. 73, № 9 – P. 1398-1415.
12. *Pels Jan R.* Rank dependence of N<sub>2</sub>O emission in fluidized-bed combustion of coal [Tekst] / Jan R. Pels, Marek A. Wójtowicz, Jacob A. Moulijn // Fuel, 1993, V. 72, № 3 – P. 373-379.
13. *Estelle Desroches-Ducarne* Modelling of gaseous pollutants emissions in circulating fluidized bed combustion of municipal refuse [Tekst] / Estelle Desroches-Ducarne, J. Christophe Dolignierb, Eric Martyb, Gérard Martinb, Lucien Delfossec // Fuel, 1998, V. 77, № 13 – P. 1399-1410.
14. *Michael D. Mann* Nitrous oxide emissions in fluidized-bed combustion: Fundamental chemistry and combustion testing [Tekst] / 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. Корінчик // Технологический аудит и резервы производства, 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 // Технологический аудит и резервы производства, 2013, № 3/1 (11). – с. 28-31.
17. *Кучин, Г.П.* Сжигание низкосортных топлив в псевдоожигенном слое [Текст] / Г.П. Кучин, В.Я. Скрипко, Н.Н. Урда. - : Техника 1987 – 144 с.
18. *Bugaeva, L.N.* An application of expert system to choice, simulation and development of gases purification processes [Tekst] / L.N. Bugaeva, Yu.A. Beznosik, G.A. Statjukha, A.A. Kvitka // J. Computers Chem. Engng, 1996, Vol. 20, Suppl. – P. S401 – S402.
19. *Beznosik Y.* An intelligent system for designing waste gas purification processes from nitrogen oxides [Tekst] / 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.