

УДК 662.93

# НОВЫЙ МЕТОД СЖИГАНИЯ ТВЕРДЫХ БИОТОПЛИВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКТИВНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ

Е.А. Пицуха<sup>1</sup>, Ю.С. Теплицкий<sup>1</sup>, Э.К. Бучилко<sup>1</sup>, В.А. Дубина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «ГСКБ», Брест, Беларусь

## Аннотация

Выполнены теоретико-экспериментальные исследования сжигания древесных пеллет и влажных древесных отходов повышенной зольности с использованием активных гидродинамических режимов, создаваемых кипящим слоем и тангенциальным вводом вторичного дутья в надслоевое пространство в модельной циклонно-слоевой топке с КС мощностью 25 кВт и аналогичной топке промышленного масштаба опытного образца водогрейного котла мощностью 2 МВт.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема рационального использования энергоресурсов является одной из глобальных проблем человечества. Ограниченные запасы ископаемых топлив, ухудшение экологической обстановки создают необходимость широкого вовлечения в энергобаланс возобновляемых энергоресурсов, к которым, прежде всего, относятся твердые топлива биологического происхождения (древесное топливо, торф, растительные отходы). Для сжигания таких топлив в настоящее время в основном применяются котлы, оснащенные топочными устройствами с неподвижным и псевдоожиженным (кипящим) слоями. Последние характеризуются рядом преимуществ [1]: высокая изотермичность, простота организации низкотемпературного (800-900 °С) сжигания, связанная с высокими коэффициентами теплообмена кипящего слоя с погруженными поверхностями нагрева к стенкам топки, что позволяет минимизировать выбросы NO<sub>x</sub> и SO<sub>2</sub> в атмосферу. Тем не менее, широкому внедрению топок с кипящим слоем мешают и некоторые недостатки этого метода сжигания, связанные со спецификой гидродинамики развитого кипящего слоя [2]. Наличие довольно интенсивного выноса мелких частиц топлива и инертного материала в надслоевое пространство при подъеме газовых пузырей в слое заставляет значительно увеличивать вертикальные габариты котла для предотвращения уноса частиц топлива и инерта из топки. Несовершенный контакт окислителя (воздуха) с топливными частицами, связанный с

особенностями двухфазной структуры кипящего слоя [2], приводят к необходимости использования режимов сжигания с повышенными избытками воздуха, снижающими КПД котла. Указанные недостатки использования метода псевдоожижения заставляют исследователей искать пути совершенствования и повышения эффективности котлов с топками кипящего слоя.

Одним из перспективных методов сжигания твердых биотоплив, разработанных в ИТМО НАН Беларуси, является метод двухстадийного сжигания в циклонно-слоевой топке с кипящим слоем. Схема топки приведена на рис. 1.

В таком топочном устройстве слоевое сжигание топлива совмещается с вихревым дожиганием вынесенных мелких фракций и газообразных горючих продуктов в надслоевом пространстве. Основными достоинствами такой конструкции являются: качественное вихревое смесеобразование летучих и продуктов неполного горения с вторичным воздухом, подаваемым тангенциально в надслоевое пространство; значительное снижение уноса мелких частиц из-за действия центробежной силы; заметное уменьшение надслоевого пространства и, следовательно, габаритов топки. Это позволяет реализовать топочный процесс с более высоким тепловым напряжением топочного объема, улучшить глубину выгорания топлива и, за счет снижения коэффициента избытка воздуха, повысить КПД котла, уменьшить капитальные и эксплуатационные затраты на тягодутьевое оборудование [3].

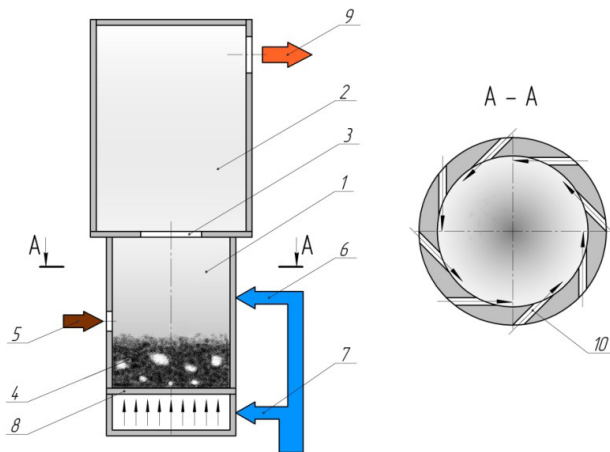


Рис.1. Схема циклонно-слоевой топки:

1 – камера сгорания (циклонно-слоевая камера),  
 2 – камера догорания, 3 – пережим, 4 – кипящий слой (инертный материал с топливом), 5 – ввод топлива, 6 – ввод вторичного воздуха (тангенциальное дутье), 7 – ввод первичного воздуха (донное дутье), 8 – газораспределительная решетка, 9 – продукты сгорания; 10 – сопла ввода вторичного воздуха

Как показывают экспериментальные исследования, при использовании такой схемы сжигания, коэффициент избытка воздуха за топкой можно снизить до нехарактерных небольших для слоевых топков значений  $\alpha = 1,15 - 1,25$  с одновременным обеспечением низкого химического недожога ( $q_3$ ) и нормативных требований [СТБ] по выбросам вредных веществ в атмосферу. По сути, разработанное топочное устройство является вихревой двухступенчатой горелкой для высокоинтенсивного сжигания твердого биотоплива с применением технологии кипящего слоя. В первой камере горелочного устройства происходит термохимическая конверсия твердого топлива, смесительные процессы и его частичное выгорание, а во второй камере окончательное дожигание горючих продуктов. В зависимости от качества топлива за счет снижения коэффициента избытка воздуха КПД котельного агрегата по сравнению котлами, оснащенными традиционными слоевыми топками можно увеличить примерно на 3-5%. Максимальная единичная мощность циклонно-слоевых топков с кипящим слоем оценивается на уровне  $\sim 10$  МВт.

## 2. ГИДРОДИНАМИКА ЦИКЛОННО-СЛОЕВОЙ КАМЕРЫ С КИПАЩИМ СЛОЕМ

Экспериментальная установка БИ-1М с циклонно-слоевой топкой показана на рис. 2. На

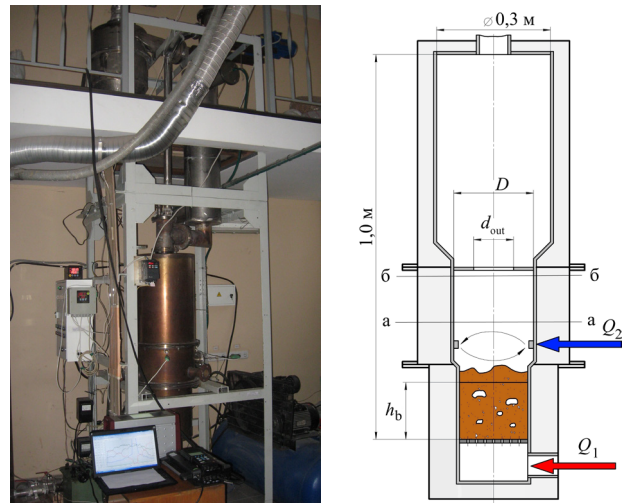


Рис. 2. Экспериментальная установка БИ-1М и схема ее циклонно-слоевой топки:

1 – стационарный зернистый слой; 2, 3 – кипящий слой

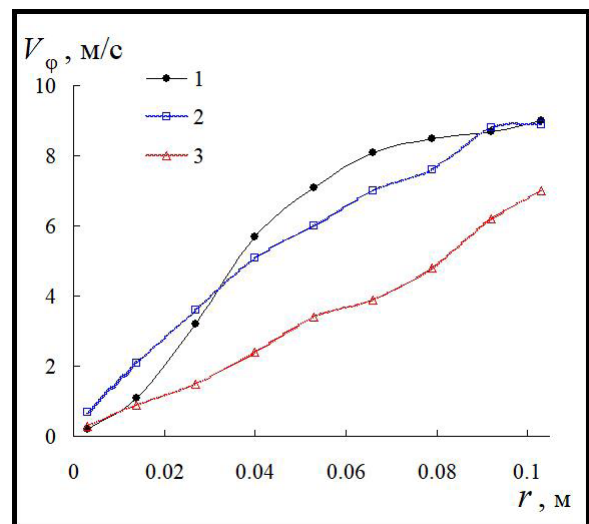


Рис. 3. Тангенциальная скорость в циклонно-слоевой топке,  $z = 0,325$  м,  $d_{out}/D = 0,5$ ,  $\varphi = 0,35$  (доля донного дутья),  $V_n = 20,4$  м/с,  $Q = 60$  м<sup>3</sup>/ч (30 0С), 2 –  $N = 1,8$ ; 3 – 4,9

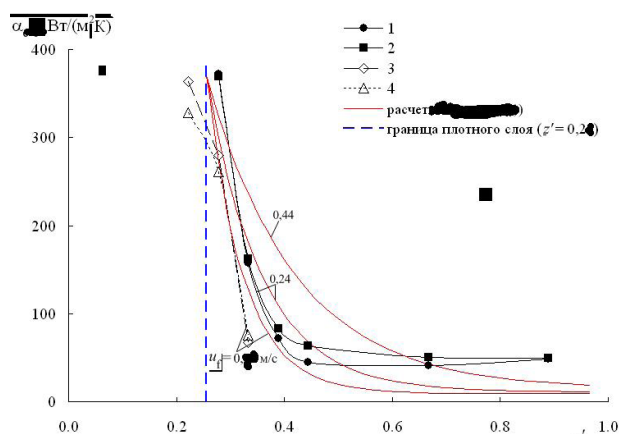
рис. 3 приведено распределение тангенциальной скорости ( $V_\phi$ ) в горизонтальном сечении «а-а» (высота над газораспределительной решеткой = 0,325 м) для разных чисел псевдооживления. Снижение уровня тангенциальной скорости вызвано влиянием уноса частиц из кипящего слоя.

## 3. СЛОЖНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ЦИКЛОННО-СЛОЕВОЙ КАМЕРЕ

Особенности сложного теплообмена в циклонно-слоевой камере с КС связаны, в первую

очередь, с наличием существенной конвективно-кондуктивной составляющей коэффициента теплоотдачи, обусловленной закруткой потока и выбрасываемыми из кипящего слоя твердыми частицами. Были выполнены измерения коэффициента сложного теплообмена в циклонно-слоевой камере методом регулярного теплового режима при холодной продувке («холодный» режим) и в режиме сжигания пеллетного древесного топлива («горячий» режим). На рис. 4 показано распределение конвективно – кондуктивной составляющей коэффициента теплоотдачи ( $\alpha_{с-с}$ ) вдоль оси циклонно-слоевой камеры в «холодном» режиме на радиусе с  $r' = 0$  и  $0,89$  при различной доле донного дутья. На этом же рисунке показаны расчетные графики коэффициента теплоотдачи в надслоевом пространстве кипящего слоя без закрутки потока, определенные по зависимости, приведенной в [4]:

$$\frac{\alpha_{с-с} - \alpha_{conv}}{\alpha_b - \alpha_{conv}} = \exp\left(-0,8 \frac{z - h_b}{h_b} Fr^{-1/3}\right) \quad (1)$$



1, 3-  $r' = 0$ ; 2, 4 -  $r' = 0,89$

Рис. 4. Распределение коэффициента теплоотдачи в циклонно-слоевой камере с кипящим слоем вдоль вертикальной координаты:  $d_{out}/D = 0,4$ ,  $f_n = 0,00106 \text{ м}^2$  – площадь выходного сечения сопел,  $Q = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$  (1 – 4),  $\varphi = 0,55$  (1, 2),  $0,35$  (3, 4),  $N = 5,1$  (1, 2),  $3,3$  (3, 4)

Из этого рисунка видно, что коэффициент теплоотдачи в надслоевом пространстве камеры с закруткой потока заметно превышает этот коэффициент для камеры без закрутки начиная с высоты  $z' = 0,45$  и  $0,55$  соответственно. Это связано с более высоким коэффициентом конвективной теплоотдачи при закрутке потока. Установлено, что в «холодном» режиме коэффициент тепло-

отдачи слабо зависит от безразмерного диаметра пережима для реализованных в эксперименте значений  $d_{out}/D = 0,4 - 0,7$ , а в области выше зоны всплесков практически не зависит от доли донного дутья в исследованном диапазоне  $\varphi = 0,35 - 0,55$ . В наибольшей степени коэффициент теплоотдачи зависит от расхода воздуха через камеру. В «горячем» режиме при горении топлива доля кондуктивно-конвективной составляющей в суммарном коэффициенте теплоотдачи к шаровому зонду в зависимости от его радиального положения оценивается в  $40 - 70\%$ .

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СЖИГАНИЯ ТВЕРДЫХ БИОТОПЛИВ В ЦИКЛОННО-СЛОЕВЫХ ТОПКАХ РАЗЛИЧНОГО МАСШТАБА

##### 4.1 Экспериментальные исследования температуры и концентрации газов в модельной топке установки БИ-1М ( $d_{out}/D = 0,5$ ).

В циклонно-слоевой топке этой установки сжигались древесные пеллеты с рабочей влажностью  $W_p = 10\%$  и низшей теплотой сгорания  $Q_p = 16,7 \text{ МДж/кг}$ . Тепловыделение в топке составляло  $N_{ch} = 25 \text{ кВт}$ , расход топлива  $B = 5,3 \text{ кг/ч}$ , коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,25$ , общий расход воздуха на горение  $Q = 31 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ), доля донного дутья  $\varphi = 0,35$ . Тепловое напряжение объема циклонно-слоевой топки составляло  $q_v = 0,52 \text{ МВт/м}^3$ , камеры сгорания  $q_{v1} = 2,3 \text{ кВт/м}^3$  и зеркала горения  $q_F = 0,98 \text{ МВт/м}^2$ . В качестве инертного наполнителя кипящего слоя использовался кварцевый песок размером  $d_s = 0,2 - 0,28 \text{ мм}$ . Высота слоя песка в неподвижном состоянии была  $h_b = 0,11 \text{ м}$ . Температура кипящего слоя составляла  $T_b = 850 - 890 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Были выполнены измерения температуры и концентраций газовых компонент ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ) с помощью газоанализатора MRU «SYNGAS» в двух горизонтальных сечениях камеры сгорания топки - «а-а» ( $z = 0,325 \text{ м}$ ) и «б-б» ( $z = 0,44 \text{ м}$ ). Графики распределения рассматриваемых параметров приведены на рис. 5, 6. На этих же графиках показаны температура и концентрация газов (сухие газы), полученные при численном моделировании (постановку задачи см. ниже).

Из рис. 5 видно, что температура в горизонтальном сечении камеры сгорания неравномерна. На периферии камеры температура газов более низкая и имеет значения  $540 - 680 \text{ }^\circ\text{C}$ . В центральной области температура достигает значений  $890 - 950 \text{ }^\circ\text{C}$ . Концентрации газовых компонент

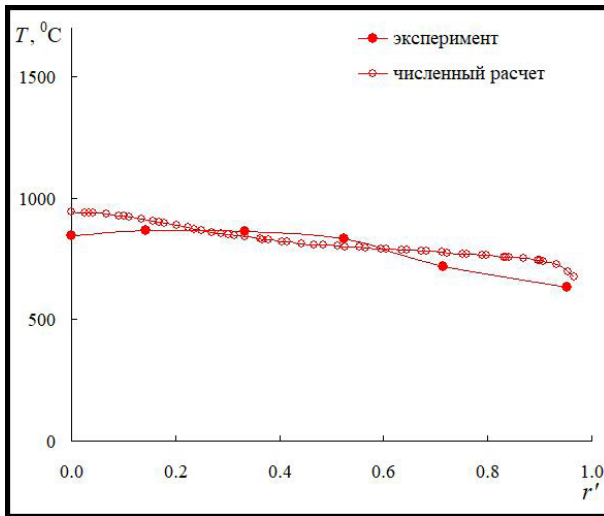


Рис. 5. Температура в камере сгорания циклонно-слоевой топке экспериментальной установки БИ-1М в верхнем горизонтальном сечении «б-б» ( $z = 0,44$  м, осчет от газораспределителя)

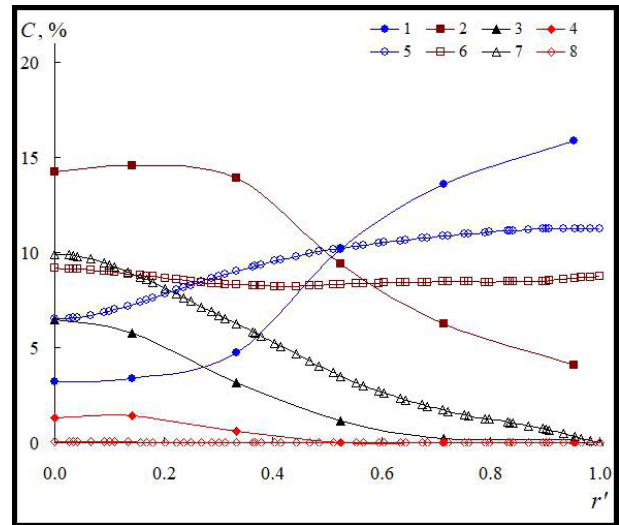


Рис. 6. Объемная концентрация газов в камере сгорания циклонно-слоевой топке экспериментальной установки БИ-1М ( $z = 0,44$  м): 1,5 –  $O_2$ ; 2, 6 –  $CO_2$ ; 3, 7 –  $CO$ ; 4, 8 –  $CH_4$  (1 – 4) – эксперимент, (5 – 8) – численный расчет

(рис. 6) также имеет неравномерный характер в радиальном направлении. На периферии камеры концентрация кислорода ( $O_2$ ) имеет максимальные значения (13 – 17%), а в центральной области снижается до минимума 3 – 5%. Концентрация горючих газовых компонент ( $CO$ ,  $CH_4$ ) наоборот, в центральной области имеет максимальные значения, а на периферии значения близкие к нулю.

#### 4.2 Численное моделирование сжигания твердого биотоплива в топке экспериментальной установки БИ-1М.

Геометрическая модель расчетной области топки и сетка элементов показаны на рис. 7. Задача решалась в осесимметричной постановке с использованием программного комплекса «Fluent». Расчетная сетка содержала около 17 тыс. треугольных элементов. На стенках, ограничивающих расчетную область задавалась шероховатость – 0,1 мм, температура стенок на основании данных измерений принималась – 400 °С их степень черноты  $\epsilon_w = 0,85$ . В выходном отверстии камеры задавалась избыточное статическое давление равное нулю ( $P_{st,out} = 0$ ). На стенках, образующих пережим, тепловой поток принимался равным нулю ( $q_w = 0$ ). На границе, соответствующей расположению сопел ввода воздуха тангенциального дутья задавался массовый расход воздуха –  $G_2 = 0,00656$  кг/с ( $T_2 = 30$  °С) и эквивалентная тангенциальная скорость –  $V_{\phi,eqv}$ .

На нижней границе области, являющейся поверхностью кипящего слоя задавался массовый

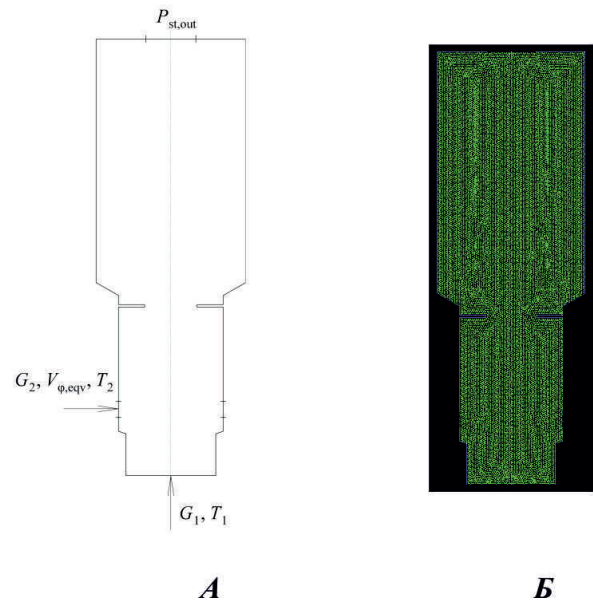


Рис. 7. Геометрическая модель (а) и расчетная сетка (б) топочного объема установки БИ-1М

расход продуктов газификации  $G_1$ . Состав продуктов газификации на выходе из кипящего слоя определялся в соответствии с равновесной стехиометрической моделью газификации топлива в КС [5], в которой учитывалось байпасирование части воздуха донного дутья (20 – 35%) с пузырями. В кипящем слое рассматривалось реагирование 7-и газовых компонент –  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ . В результате расчета получен

массовый расход продуктов газификации, объемный состав и их температура на выходе слоя:  $G_1 = 0,00496$  кг/с,  $\text{CO} - 17,8\%$ ,  $\text{CO}_2 - 8,8\%$ ,  $\text{H}_2 - 14,6\%$ ,  $\text{H}_2\text{O} - 7,7\%$ ,  $\text{CH}_4 - 1,2\%$ ,  $\text{N}_2 - 47,8\%$ ,  $\text{O}_2 - 2,1\%$ ,  $T_b = 835$  °С. В объеме циклонно-слоевой топке принимались следующие реакции горения:  $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$ ;  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$

+  $\text{CO}_2$ . Использовалась стандартная «к-ε» модель турбулентности. Для расчета скорости реагирования принималась модель Магнуссена - «Eddy Dissipation Model» [6].

Распределение температуры и концентрации монооксида углерода (CO) в топочном объеме, полученное в результате численного моделирования показано на рис. 8. Как и в эксперименте, температура и концентрация газов в горизонтальных сечениях камеры сгорания в основном имеет неравномерный характер.

На рис. 8, б и в сравнивается концентрация (CO) в объеме топке при наличии пережима (б) и без пережима (в). Видно, что в топке с пережимом процесс выгорания CO завершается раньше, чем без пережима. В результате расчета получена температура на выходе топке – 716 °С близкая к экспериментальным значениям – 700–740 °С.

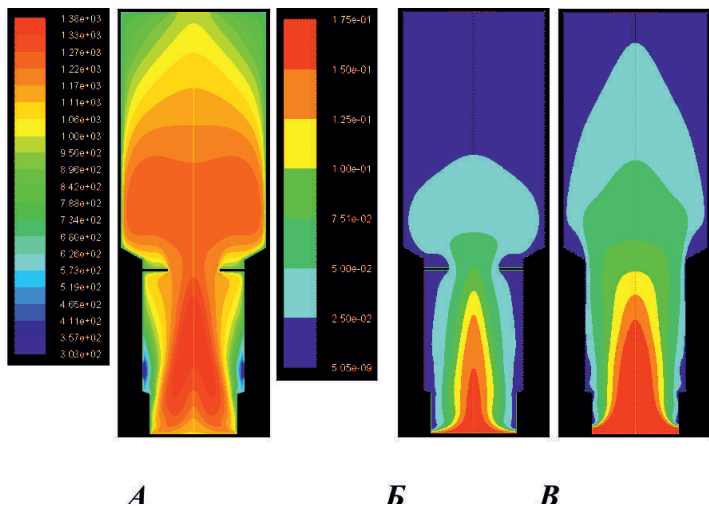


Рис. 8. Распределение температуры (K) (а) и объемная концентрация монооксида углерода (CO) в топке экспериментальной установки:  
а, б –  $d_{out}/D = 0,5$ , в –  $1,0$

**4.3 Экспериментальные и численные исследования сжигания твердого биотоплива в циклонно-слоевой топке котла мощностью 2 МВт (рис. 9)**

В топке опытного образца промышленного котла номинальной мощностью 2 МВт сжигались влажные и высокозольные древесных отходы (древесина, собранная при уборке городской территории,  $W_p = 44\%$ ,  $A_p = 11\%$ ,  $Q_n^p = 7,5$  МДж/кг). Измерения температуры и концентрации газов проводилось в четырех горизонтальных сечениях камеры сгорания и камеры догорания – «а, б, в, г» (рис. 9). Сечения располагались на расстоянии  $z = 0,95$  м; 1,4; 1,9; 2,8 над верхней частью газораспределительной решетки, соответственно. В процессе измерений тепловыделение в топке составляло  $N_{ch} = 1,8$  МВт (76% от номинальной мощности). В этом режиме тепловое напряжение объема топке было  $q_V = 0,5$  МВт/м<sup>3</sup>, камеры сгорания  $q_{V1} = 1,4$  МВт/м<sup>3</sup> и зеркала горения  $q_F = 1,7$  МВт/м<sup>3</sup>. Результаты измерений приведены на рис. 10–12.

Распределение температуры и концентрации газов в камере сгорания топке с КС промышленного котла 2 МВт, как и для циклонно-слоевой топке малого масштаба ( $D = 0,21$  м) имеет

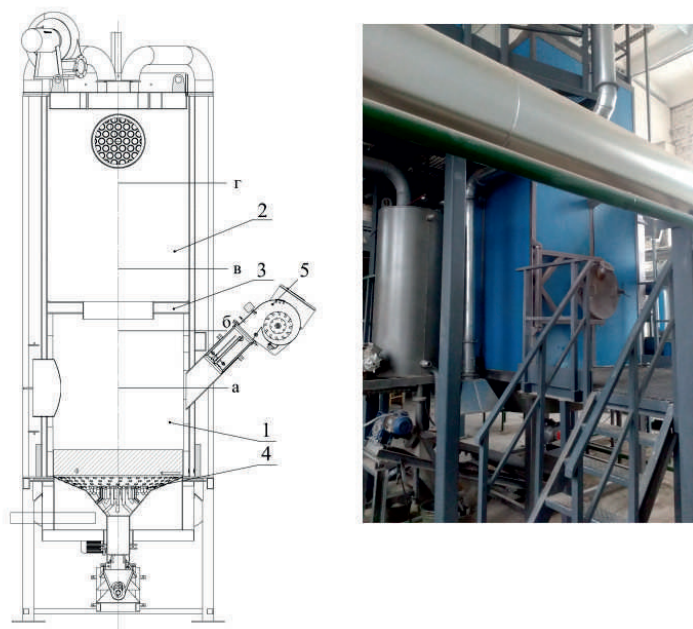


Рис. 9. Циклонно-слоевая топка котла мощностью 2 МВт ( $d_{out}/D = 0,55$ ):  
1 – камера сгорания, 2 – камера догорания, 3 – пережим, 4 – газораспределитель, 5 – растопочная горелка

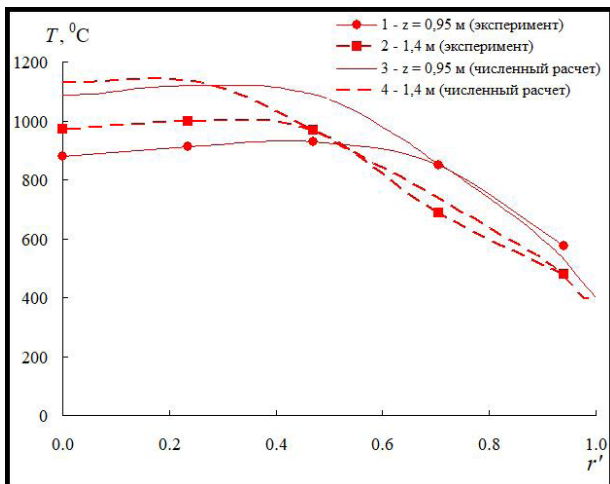


Рис. 10. Температура в камере сгорания циклонно-слоевой топке котла мощностью 2 МВт 1, 5 –  $O_2$ ; 2, 6 –  $CO_2$ ; 3, 7 –  $CO$ ; 4, 8 –  $CH_4$  (1 – 4) – эксперимент, (5 – 8) – численный расчет

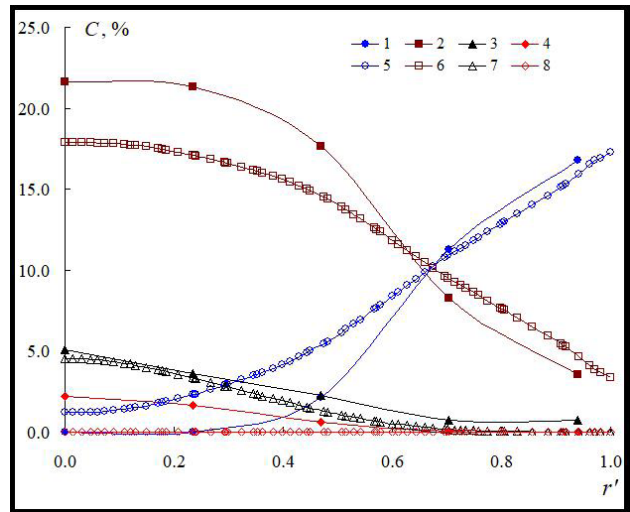


Рис. 11. Объемная концентрация газов в камере сгорания циклонно-слоевой топке котла мощностью 2 МВт (сечение  $z = 0,95$  м)

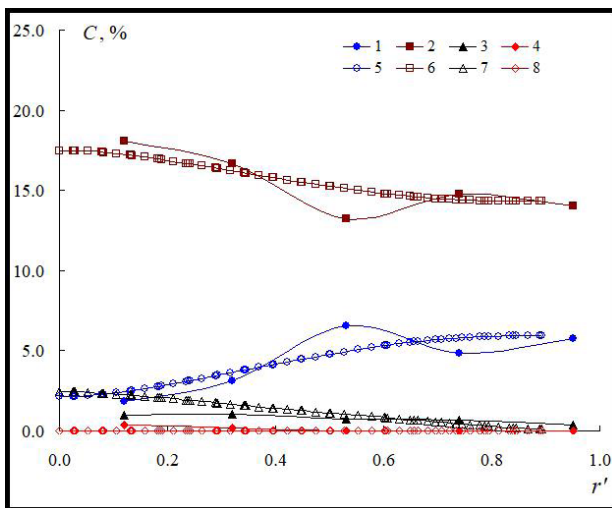


Рис. 12. Объемная концентрация газов в камере догорания циклонно-слоевой топке котла мощностью 2 МВт (сечение  $z = 1,9$  м, обозначения такие же, как на рис. 11)

неравномерный характер (рис. 10, 11). Профили распределения температуры и газовых компонент аналогичны топке малого масштаба (рис. 6). Наибольшие значения концентрации горючих газов ( $CO$ ,  $CH_4$ ) наблюдаются в центральной области  $CCO = 5\%$ ,  $CCH_4 = 2,3\%$ , а наименьшие на периферии камеры (рис. 11). Концентрация кислорода имеет максимальные значения на периферии, которые достигают  $CO_2 = 15 - 17\%$ , а наименьшие в приосевой области камеры сгорания. В камере догорания концентрации газов быстро выравниваются и происходит выгорание

горючих газов. Уже в начале камеры догорания, в ее нижнем сечении ( $z = 1,9$  м) концентрация монооксида углерода ( $CO$ ) не превышает 1,5%, а концентрация метана ( $CH_4$ ) 0,5%. В верхнем сечении этой камеры ( $z = 2,8$  м) концентрация газов практически постоянна, а концентрация горючих газов ( $CO$ ,  $CH_4$ ) близка к нулю (рис. 12). Быстрое выравнивание профилей температур и концентраций газов во второй камере обусловлено интенсивными массообменными процессами на входе в эту камеру, благодаря формированию рециркуляционных течений.

При численном моделировании сжигания топлива в топке этого котла использовался подход аналогичный вышеизложенному для экспериментальной установки БИ-1М. Получено, что расчетная температура и концентрация газов в объеме топке неплохо соответствуют экспериментальным данным. На выходе топке расчетная температура газов составила  $847^\circ C$ , а ее экспериментальные значения –  $800 - 830^\circ C$ .

## 5. Заключение

1. Экспериментально установлены особенности распределений температуры и концентрации газов в циклонно-слоевых топках с КС различного масштаба, реализующих активные гидродинамические режимы сжигания топлива. В горизонтальных сечениях камеры сгорания температура и концентрация газовых компонент в камере сгорания имеет неравномерный характер. В камере догорания профиль температур и концентраций в горизонтальных сечениях быстро выравнивается

благодаря наличию на ее входе рециркуляционных зон и интенсивному массопереносу.

2. Получено хорошее соответствие результатов численного моделирования экспериментальным данным. Расчетная температура на выходе циклонно-слоевых топок различного масштаба отличается не более чем на 40 °С от экспериментальных значений.

#### Список обозначений

$C$  – объемная концентрация газов;  
 $D$  – диаметр камеры сгорания (догорания), м;  
 $F_r = (u_f - u_{mf})^2 / g h_b$  – число Фруда;  
 $G$  – массовый расход воздуха (продуктов газификации), кг/с;  
 $H = 0,45$  м – высота камеры сгорания;  
 $N = u_f / u_{mf}$  – число псевдооживления;  
 $Q$  – объемный расход воздуха, м<sup>3</sup>/час;

$R = D / 2$  – радиус камеры сгорания (камеры догорания), м;

$r$  – радиальная координата, м;

$r' = r / R$  – безразмерная радиальная координата ;

$T$  – температура, °С (К);

$u_f$  – скорость фильтрации газа в кипящем слое, м/с;

$u_{mf}$  – скорость начала псевдооживления, м/с;

$V_n$  – скорость воздуха на выходе из сопел, м/с;

$z$  – вертикальная координата, м;

$z' = z / H$  – безразмерная вертикальная координата, м;

$\alpha_b, \alpha_c, \alpha_{conv}$  – коэффициент теплоотдачи: в слое, конвективно-кондуктивный, конвективный, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

*Индексы:*

$f$  – газ;  $n$  – сопло;  $out$  – выход камеры сгорания (топки);  $\varphi$  – тангенциальный.

#### Список литературы

1. Баскаков А.П., Мацнев В.В., Распопов И.В. Котлы и топки с кипящим слоем. Москва. Энергоатомиздат. 1995.
2. Кунии Д., Левеншпиль О. Промышленное псевдооживление. Москва. Химия. 1976.
3. Пицуха, Е.А. Сжигание твердых биотоплив в циклонно – слоевой топочной камере / Пицуха Е.А., Теплицкий Ю.С., Бородуля В.А. // , Теплоэнергетика. – 2014 - №7. – С. 18 – 24.
4. Пальченко Г.И., Аббас Фалих Хассан. Распределение твердой фазы в надслоевом объеме аппаратов с кипящим и циркулирующим слоем. Минск: АНК ИТМО им. А.В. Лыкова АН БССР. – С.142-154, 1991.
5. Basu P. Biomass gasification and pyrolysis: Practical design and theory. Elsevier, 2010. 364 p.
6. Magnussen B.F., and Hjertager V.H. On Mathematical Modelling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion, Sixteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 719-729, 1976.