

УДК 662.61

А.Б. Бирюков /д.т.н./, В.А. Семергей
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЫГОРАНИЯ ПОЛИФРАКЦИОННОГО ФАКЕЛА

Исследована параметрическая чувствительность математической модели выгорания полифракционного пылеугольного топлива в топке энергетического котла. При этом рассмотрено влияние погрешности задания таких параметров, как диффузионное число Нуссельта, коэффициент молекулярной диффузии, расчетная плотность частиц топлива, константа скорости реакции горения углерода, температура продуктов сгорания на содержание остаточного углерода. Установлено, что наибольшее влияние оказывают расчетная плотность частиц топлива и температура продуктов сгорания, а погрешности задания диффузионного числа Нуссельта, коэффициента молекулярной диффузии и константы скорости реакции оказывают умеренное влияние порядка 0,7-2 % изменения результата на 1 % изменения параметра. Показано, что использование средней температуры продуктов сгорания в топке котла вместо реального пространственно-временного закона ее изменения приводит к погрешности определения остаточного углерода порядка 5 %.

Ключевые слова: угольная пыль, энергетический котел, диффузионное число Нуссельта, коэффициент молекулярной диффузии, константа скорости реакции.

Постановка проблемы

При создании математических моделей технологических процессов особую роль играет изучение вопроса о влиянии неточности задания параметров процесса на погрешность определения искомых величин. Исследование моделей с этой точки зрения носит название исследования параметрической чувствительности модели.

Как правило, оно реализуется путем проведения нескольких серий численных экспериментов. При этом задаются базовые значения всех параметров модели, а в каждой из серий численных экспериментов варьируется значение только одного параметра (остальные параметры остаются на базовом уровне). Анализ результатов численных экспериментов в пределах каждой серии позволяет выявить степень влияния параметра на искомую величину. В последующем при использовании математической модели к заданию параметров, имеющих значительную степень влияния на искомые величины, следует подходить особенно тщательно. Характеристики параметрической чувствительности модели должны быть учтены на стадии адаптации математической модели.

Анализ последних исследований и публикаций

В последнее время разработано значительное количество моделей выгорания пылеугольного топлива в топках энергетических котлов [1-5].

Для использования математических моделей в практических условиях в качестве прогнозного компонента значительный интерес представляют упрощенные быстродействующие модели. Модель такого плана разработана в работе [5]. Для ее дальнейшего использования необходимо провести исследование параметрической чувствительности модели. Эта математическая модель выгорания полифракционного пылеугольного топлива в топке энергетического котла базируется на рассмотрении системы обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, описывающих изменение размера частиц каждой из выделенных для рассмотрения фракций. При этом парциальное давление кислорода в каждый момент времени определяется на основании рассмотрения одновременного выгорания частиц всех фракций. При проведении численных экспериментов для типовых условий эксплуатации котла ТП-100, сжигающего антрацитовую пыль, показана достаточная для предварительного рассмотрения степень соответствия расчетных и практических данных о доле несгоревшего углерода и величине механического недожога. Доказано, что результат определения доли несгоревшего углерода (в дальнейшем остаточного углерода) существенно зависит от количества выделенных для рассмотрения фракций пыли. Также на основании анализа расчетных данных об изменении остаточного углерода и скорости выгорания углерода сделан вывод о целесообразности

сти предварительной тепловой обработки пыли для уменьшения времени задержки воспламенения частиц в топке котла. Для адаптации данной модели к условиям конкретных энергетических котлов и ее дальнейшего эффективного использования важно провести процедуру исследования параметрической чувствительности, например, с использованием опыта работ [6-7].

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является исследование параметрической чувствительности математической модели выгорания полифракционного факела.

Основной материал исследования

В основе математической формулировки данной модели лежит рассмотрение системы обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, описывающих изменение размера частиц каждой из выделенных для рассмотрения фракций. Порядок химической реакции принят равным 1 по кислороду как компоненту, находящемуся в недостатке. Считается, что конечным продуктом горения является CO₂, а горением CO в пределах пограничного слоя можно пренебречь. Исходя из этого, используется следующий шаблон записи этого уравнения:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \frac{P}{RT} \cdot 0,21 \cdot \frac{2 \cdot M_C}{\rho_k} \cdot \frac{V_k^0}{V_z} \times \frac{k_r}{1 + \left(\frac{1}{Nu_D}\right) \cdot \frac{k_r \cdot \delta_i}{D}} \times \left[(\alpha - 1) \cdot \frac{V^0}{V_k^0} + G \right], \quad (1)$$

где δ – размер частицы, м; P – давление в топочной камере, Па; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – текущее значение температуры поверхности частицы, К; ρ_k – расчетная плотность частиц топлива, кг/м³; M_C – молярная масса углерода, кг/кмоль; V^0 – объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 кг угля, м³/кг; V_z – объем продуктов сгорания, образующихся при сгорании 1 кг угля, м³/кг; V_k^0 – объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 кг углерода (8,89 м³/кг); k_r – константа скорости реакции окисления углерода, взятая при соответствующем значении температуры поверхности частицы топлива, м/с; Nu_D – диффузионное число Нуссельта; D – коэффициент диффузии кислорода в газообразной среде, окружающей части-

цу, м²/с; G – текущая доля несгоревшего углерода коксового остатка, кг; α – коэффициент расхода воздуха.

Под расчетной плотностью частиц топлива понимается кажущийся удельный вес частиц угольной пыли после полной возгонки летучих и мысленного удаления золы из объема частицы.

На основе анализа уравнения принято решение провести анализ чувствительности модели к точности задания следующих параметров: диффузионное число Нуссельта, коэффициент молекулярной диффузии, расчетная плотность частиц топлива, константа скорости реакции, температура продуктов сгорания.

Численные эксперименты по исследованию выгорания полифракционной пыли проведены для условий котла ТП-100 одной из электростанций Донбасса.

Состав угля, поступающего на горелки котла, %: C^c=90; H^c=4; N^c=0,94; O^c=4; S^c=1,06; A^c=19; W^p=0,7. Объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 кг угля заданного состава, и удельный выход продуктов сгорания в действительных условиях определены при помощи стандартных расчетных зависимостей, используемых в теории горения топлива [2]: V⁰=7,367 м³/кг, V_z=9,069 м³/кг.

В первом приближении для расчета использованы данные ситового анализа пыли от пробы, отобранной после мельницы из аэрационного пылепитателя (АПП) промежуточного бункера пыли (табл. 1).

Время выгорания для исследования параметрической чувствительности задано на уровне 2,8 с (по опыту работы [5]). Временной шаг для решения системы уравнений численным методом выбран таким образом, что его дальнейшее уменьшение приводит к уточнению результата не более чем на 0,001 %.

Базовые значения выбраны для исследований параметров согласно [5] и установлены на следующих уровнях: диффузионное число Нуссельта $Nu_D = 2$; коэффициент молекулярной диффузии

Табл. 1. Ситовый анализ пыли, отобранной из (АПП) промежуточного бункера пыли

№ п/п	Класс крупности, мм	Массовая доля, %
1	0,16-0,125	2,1
2	0,125-0,104	4
3	0,104-0,083	4
4	0,083-0,063	3,9
5	0,063-0,040	10,4
6	0,040-0	75,6
Итого		100,0

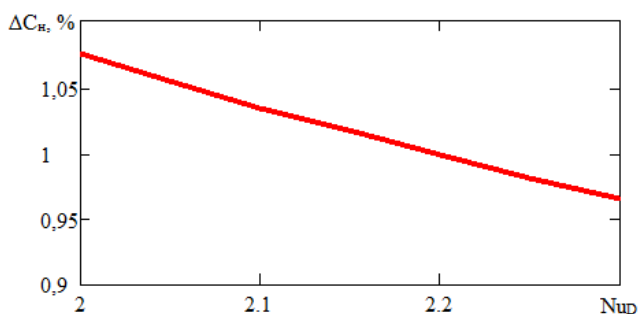


Рис. 1. Влияние диффузионного числа Нуссельта на общую величину остаточного углерода

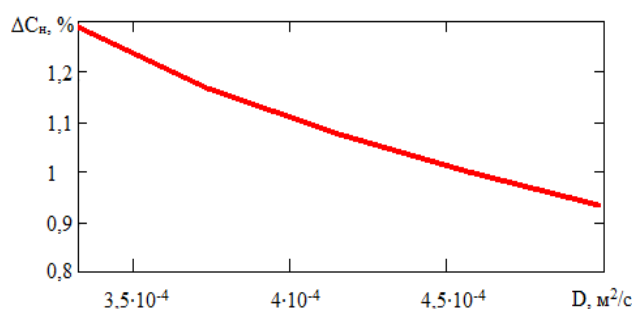


Рис. 2. Влияние коэффициента молекулярной диффузии на общую величину остаточного углерода

$D = 4,15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; плотность частиц топлива $\rho_k = 958 \text{ кг}/\text{м}^3$; константа скорости реакции горения углерода $k_r = 4,5 \text{ м}/\text{с}$; температура продуктов сгорания в топке $T = 1800 \text{ К}$. Сущность исследования заключается в имитации погрешности в задании каждого из параметров по отдельности и сравнении результатов моделирования при базовом и содержащем погрешность значениях параметра.

Влияние диффузионного числа Нуссельта

Поскольку минимальное значение этого параметра составляет 2, рассмотрено влияние его повышения на величину остаточного углерода в диапазоне изменения числа Нуссельта от 2 до 2,3. В результате установлено, что увеличение числа Нуссельта сопровождается уменьшением остаточного углерода по практически линейной зависимости (рис. 1).

При этом изменение диффузионного числа Нуссельта на 15 % приводит к изменению остаточного углерода на 11,4 %. Полученный результат является достаточно логичным, поскольку увеличение диффузионного числа Нуссельта свидетельствует об интенсификации процессов массообмена на границе поток – приведенная пленка, что в общем случае облегчает условия поступления кислорода в приведенную пленку и улучшает условия выгорания топлива.

Влияние коэффициента молекулярной диффузии

Установленное базовое значение коэффициента молекулярной диффузии получено исходя из данных работ [1,5] для типовых условий горения ПУТ в топке энергетического котла. По сравнению с базовой точкой рассмотрены еще четыре уровня D , меньше и больше базовой точки на 10 и 20 %. Результаты представлены на рис. 2.

Установлено, что при увеличении коэффициента молекулярной диффузии величина остаточного углерода понижается по зависимости близкой к линейной. В исследованном диапазоне изменение D на величину 50 % приводит к измене-

нию остаточного углерода на 38 %. Полученный результат соответствует логике протекания процесса, поскольку увеличение коэффициента молекулярной диффузии приводит к снижению диффузионного сопротивления приведенной пленки и имитирует облегчение условий доступа кислорода к поверхности горящего углерода.

Влияние расчетной плотности частиц

Относительно базового уровня плотности коксового остатка рассмотрены еще четыре уровня ρ_k на 10 и 20 % больше и меньше базового уровня. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

Как видим, увеличение задаваемого в модель значения ρ_k приводит к увеличению остаточного углерода по зависимости близкой к линейной. В исследованном диапазоне изменение величины ρ_k на 50 % приводит к изменению остаточного углерода на 206,5 %. Этот расчетный результат является логичным, так как для более плотного материала, при том же количестве доставляемого к поверхности частиц кислорода и его расходовании на окисление углерода, скорость уменьшения размера частиц должна уменьшаться, а частицы являются более тяжелыми, что и определяет большее расчетное значение остаточного углерода.

Установленная закономерность указывает на важность выбора подхода к заданию плотности выгорающих частиц топлива. Обычно этому вопросу не уделяется достаточно внимания. Хотя вопрос остается открытым. В принципе возможны варианты задания в качестве ρ_k следующих значений:

- истинной плотности угля;
- плотности частиц с учетом выхода летучих (в исходном массиве частиц остаются нелетучий углерод и зола);
- плотности частиц из предположения, что в их объеме частиц остается только нелетучий углерод, а вся зола выплавляется и в виде шарообразных тел, существенно меньших, чем сама частица, и стыкующихся с поверхностью частицы,

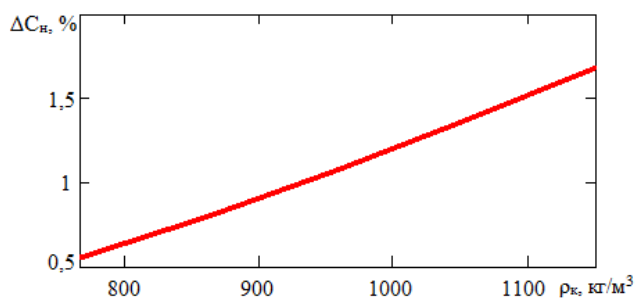


Рис. 3. Влияние плотности коксового остатка на общую величину остаточного углерода

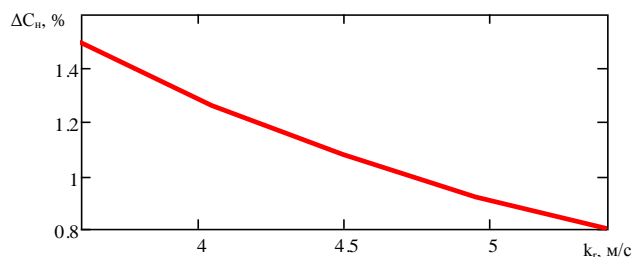


Рис. 4. Влияние константы скорости реакции окисления углерода на общую величину остаточного углерода

не препятствуя ее выгоранию [1].

Логично предположить, что на начальном этапе выгорания частицы более справедливым является второй подход, но в течение большей части процесса горения истинная плотность частиц будет ближе всего к значению, определяемому третьим способом. Для моделирования удобно пользоваться единым подходом. В данной работе выбран третий подход. Именно с его помощью было сформулировано базовое использование для исследования значения расчетной плотности частиц для используемого состава угля – 958 кг/м³.

Влияние константы скорости реакции

В качестве базового уровня выбрано значение 4,5 м/с (по данным работы [1]). Рассмотрены еще четыре уровня k_r на 10 и 20 % больше и меньше базового уровня. Результаты представлены на рис. 4.

Как видим, увеличение задаваемого в модель значения k_r приводит к снижению остаточного углерода по зависимости близкой к линейной. В исследованном диапазоне изменение величины k_r на 50 % приводит к изменению остаточного углерода на 87 %. Этот результат является логичным – с ростом константы скорости реакции остаточный углерод должен уменьшаться.

Значение константы скорости реакции углерода определяется при помощи следующего выражения:

$$k_r = k_{r0} \cdot e^{\frac{E}{RT}}, \quad (2)$$

где k_{r0} – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации реакции, кДж/кмоль.

Исходя из характера зависимости для определения k_r видно, что проведенное исследование (диапазон изменения $k_r \pm 20\%$ от базового уровня) отвечает на вопросы влияния погрешности задания k_r , полученной либо посредством неточного задания предэкспоненциального множителя, либо при крайне незначительных погрешностях задания температуры, поскольку при по-

грешностях задания температуры уже в несколько десятков градусов неточность определения k_r будет составлять сотни процентов и оказывать очень существенное влияние на результаты определения остаточного углерода.

Влияние температуры продуктов сгорания

Если подойти формально к исследованию этого вопроса и рассмотреть влияние температуры только лишь как термического параметра состояния в уравнениях типа (1), то будет получен следующий результат: увеличение температуры приводит к увеличению остаточного углерода. С расчетной точки зрения этот результат объясняется уменьшением действительной плотности продуктов сгорания при увеличении их температуры. Однако в целом это противоречит логике процесса – из практики известно, что увеличение температуры приводит к более качественному выгоранию топлива. Аналогичную ситуацию имеем при рассмотрении вопроса о влиянии коэффициента расхода воздуха. Если полагать, что этот параметр определяет только концентрацию кислорода в продуктах сгорания, то при исследовании параметрической чувствительности окажется, что увеличение коэффициента расхода воздуха приводит к существенному понижению остаточного углерода. С расчетной точки зрения это объясняется повышением концентрации кислорода. Однако этот результат также противоречит логике протекания процесса – из практики известно, что данная зависимость носит экстремальный характер и повышение коэффициента расхода воздуха выше некоторого рационального значения приводит к повышению остаточного углерода из-за захлаживания топки.

Поэтому, исследуя параметрическую чувствительность модели по отношению к точности задания температуры, необходимо учитывать не только ее влияние как термического параметра состояния, но и влияние на значение константы скорости реакции (зависимость (2)). Исследование проведено относительно базового уровня средней температуры продуктов сгорания в топ-

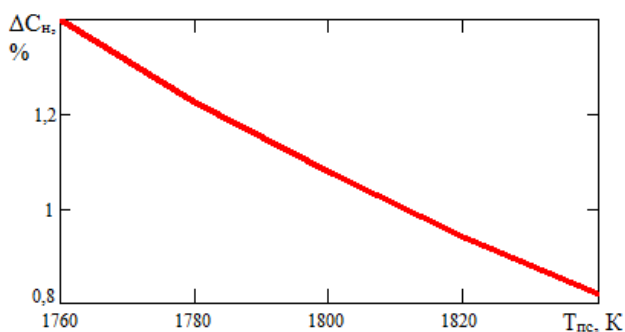


Рис. 5. Влияние средней температуры продуктов сгорания на общую величину остаточного углерода

ке котла 1800 К. Рассмотрено изменение температуры в пределах 1760-1840 К. Результаты представлены на рис. 5.

Установлено, что с увеличением температуры понижается содержание остаточного углерода. Так, изменение средней температуры в диапазоне 1760-1840 К приводит к снижению остаточного углерода на 70 %.

Важным также является вопрос, оказывает ли влияние на результаты расчетов задание средней температуры продуктов сгорания в топке вместо реального закона изменения температуры. Для решения этой задачи было проведено при прочих равных условиях два численных эксперимента: со средним значением температуры в топке 1800 К и с учетом изменения этой величины по следующему закону:

$$T = \begin{cases} 1800, & \text{если } \tau < 0,5; \\ 2130 - (2130 - 1470) \cdot (\tau - 0,5) / 2,3, & \\ \text{если } 0,5 \leq \tau \leq 2,8. \end{cases}$$

При составлении этого закона изменения температуры использованы экспериментальные данные о температуре в ядре факела (при встрече факелов горелок, установленных на противоположных боковых стенах топки в ее средней части) и температуре продуктов сгорания на выходе из топки. Среднеинтегральное значение температуры продуктов сгорания по этому закону также составляет 1800 К.

В первом случае получено значение остаточного углерода 1,075 %, а во втором – 1,125 %. Таким образом, учет закона изменения температуры в топке позволил уточнить значение остаточного углерода на величину порядка 5 %.

Выводы

В результате исследования параметрической чувствительности математической модели выгорания полифракционного факела установлено,

что значительное влияние на результаты моделирования оказывает задание плотности коксового остатка и температуры продуктов сгорания при условии ее прямого учета на значение константы скорости реакции.

Так, в исследованных диапазонах названных величин для плотности коксового остатка остаточный углерод увеличивается на 4 %, а для температуры продуктов сгорания уменьшается на 17 % на каждый процент роста значений этих величин. Также установлено, что учет реального закона изменения температуры в топке позволяет уточнить результаты на величину порядка 5 %.

Для остальных исследованных параметров (диффузионное число Нуссельта, коэффициент молекулярной диффузии и константа скорости реакции при ее прямом задании) установлено, что погрешность определения остаточного углерода составляет порядка 1-2 % на каждый процент неточности задания названных параметров.

Полученные результаты важны для адаптации рассматриваемой модели к условиям конкретных энергетических котлов и ее дальнейшего эффективного использования, поскольку позволяют выделить параметры, к заданию которых необходимо относиться наиболее тщательно, и создают предпосылки для формирования обоснованной оценки точности получаемых результатов моделирования.

Список литературы

1. Основы практической теории горения: учебное пособие для вузов / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др.; под ред. В.В. Померанцева. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
2. Бирюков, А.Б. Сжигание и термическая переработка органических топлив. Твердое топливо: учеб. пособ. для вузов / А.Б. Бирюков, И.П. Дробышевская, Ю.Е. Рубан; ГВУЗ «ДонНТУ». – Донецк: Изд-во «Ноулидж». Донецкое отд-ние, 2014. – 232 с.
3. Ranade, V. V. Computational Modeling of Pulverized Coal Fired Boilers / V. V. Ranade, D. F. Gupta. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 271 p.
4. Díez, L. I. Modelling of pulverized coal boilers: review and validation of on-line simulation techniques / L. I. Díez, C. Cortés, A. Campo // Applied Thermal Engineering. – Vol. 25. Iss. 10. – 2005. – P. 1516-1533.
5. Бирюков, А.Б. Математическая модель выгорания пылеугольного топлива в топке энергетического котла / А.Б. Бирюков, В.А. Семергей // Вестник ДонНТУ. – 2017. – №1. – С. 32-37.

6. Ткаченко, В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов. Т.13. – Сер. «Задачи и методы: математика, механика, кибернетика». – Киев: Наукова думка, 2008. – 244 с.
7. Churchill, Stuart W. The accuracy and parametric sensitivity of algebraic models for turbulent flow and convection / Stuart W. Churchill, Bo Yu, Yasuo Kawaguchi // International Journal of Heat and Mass Transfer. – Vol. 48. Iss. 25-26. – 2005. – P. 5488 -5503.

A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.)/, V.A. Semergey
Donetsk National Technical University (Donetsk)

STUDYING THE PARAMETRIC SENSITIVITY OF THE MATHEMATICAL MODEL FOR POLYFRACTIONAL TORCH BURNOUT

Background. *The well-known mathematical model for studying of combustion technology of pulverized coal in furnaces of power boilers is represented by several ordinary differential equations of the 1st order, describing the change in the characteristic dimensions of the particles for each of the fractions. To adapt this model to the conditions of specific power boilers and its further effective usage it is necessary to study its parametric sensitivity, which determined the objective of this paper.*

Materials and/or methods. *The analysis of parametric sensitivity of the model is carried out with respect to the exact specifications of the following parameters: diffusion Nusselt number, Nu_D , the molecular diffusion coefficient, D , the estimated density of particles, ρ_k , the rate constant of the reaction, k_r , the temperature of combustion products, T . The basic values of the parameters were chosen as 2; $4.15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$; $958 \text{ kg}/\text{m}^3$; 4.5 m/s ; 1800K . The essence of the study is to simulate the error in setting each parameter individually and comparing the modeling results obtained with basic and inexact parameter values.*

Results. *The ranges of 2-2.3 and $3.32 \cdot 10^4 - 4.98 \cdot 10^4 \text{ m}^2$ are studied for Nu_D and D respectively. In both cases, the increase in these variables leads to a reduction of residual carbon in almost linear dependency. For every percent of their change the result changes by less than one percent. For ρ_k the range of $766-1150 \text{ kg}/\text{m}^3$ studied. The increase of ρ_k leads to an increase in residual carbon of about 4 % for every one percent change of ρ_k . For k_r the range of $4.6-5.4 \text{ m/s}$ studied. The increase in this value leads to a decrease in residual carbon of about 1.6 % for each percent change of k_r . For T the range of $1760-1840 \text{ K}$ studied. The increase in this value leads to a decrease in the content of remaining carbon of about 17 % for each percent change of T . It is also shown that the consideration of the real principle of temperature change in the furnace allows specifying the results to 5 %.*

Conclusion. *The results of the simulation are greatly influenced by a precise specification of the temperature of combustion products and density of the coke residue. The inaccuracy of specifying the diffusion Nusselt number, the molecular diffusion coefficient and the rate constant of the reaction (directly specified) leads to errors in determining the residual carbon about 1-2 % for each percent of the inaccurate specifying of parameters.*

Keywords: *coal dust, power boiler, diffusion Nusselt number, molecular diffusion coefficient, the rate constant of the reaction, the temperature of combustion products.*

Сведения об авторах

А.Б. Бирюков

РИНЦ SPIN-код: 3186-0680
 SCOPUS ID: 7006918782
 ORCID ID: 0000-0002-8146-2017
 Телефон: +380 (62) 301-08-61
 Эл. почта: birukov.ttf@gmail.com

В.А. Семергей

Телефон: +380 (66) 189-60-57
 Эл. почта: semergey79@mail.ru

*Статья поступила 05.07.2017 г.
 © А.Б. Бирюков, В.А. Семергей, 2017
 Рецензент д.х.н., проф. В.В. Шаповалов*