

УДК 662.87

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНО ВЫСОКОЙ АМПЛИТУДЫ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В ЗАДАЧАХ ПОДАЧИ ПЫЛЕВИДНОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОР ГАЗИФИКАЦИИ

Куфтырев К.А., Колосницын А.Н.

Закрытое акционерное общество «Бюро техники»,

Санкт-Петербург, e-mail: kuftyrev.konstantin@bt-comfort.ru, kolosnitsin.andrey@bt-comfort.ru

Рассматривается истечение пылевоздушной смеси твёрдого топлива в камеру газификации через горелочное устройство, представляющее собой прямоугольное отверстие перекрытое полукруглым арочным элементом. В качестве твёрдого топлива выбран каменный уголь. Численно исследуется влияние автоколебательного характера истечения на распределение температуры в камере и на протекание реакций газификации. Вычислительный алгоритм, реализованный в программном комплексе STAR-CCM+, включает в себя сеточную аппроксимацию по пространству второго порядка точности, неявный метод интегрирования по времени первого порядка точности и алгебраический многосеточный метод решения систем алгебраических уравнений. Показано, что предложенный способ подачи пылевоздушной смеси обеспечивает равномерный распыл топлива по пространству реактора, обеспечивая тем самым лучшие условия для протекания реакций газификации. Выход синтез-газа в рассмотренном случае составляет 2,35 м³/кг топлива и имеет теплотворную способность 5,0 МДж/м³.

Ключевые слова: численное моделирование, газификация пылевидного топлива, каменный уголь, автоколебания, синтез-газ

USING THE PHENOMENON OF ABNORMALLY HIGH AMPLITUDE OF SELF-OSCILLATORY PROCESS IN THE TASKS SUPPLY OF PULVERIZED FUEL IN THE GASIFICATION REACTOR

Kuftyrev K.A., Kolosnitsyn A.N.

Bureau of Technics, St.-Petersburg,

e-mail: kuftyrev.konstantin@bt-comfort.ru, kolosnitsin.andrey@bt-comfort.ru

Considered outflow a dusty mixture of solid fuel in the gasification chamber through the burner, representing a rectangular hole covered by a semi-circular arch element. As a solid fuel selected hard coal. Numerically investigate the influence of the oscillatory nature of the outflow of the temperature distribution in the chamber and on the reactions of gasification. Computational algorithm implemented in the software package STAR-CCM+ includes a grid approximation of the space of the second order accurate, implicit method for the time integration of the first order accurate and algebraic multigrid method for solving systems of algebraic equations. It is shown that the proposed method of supplying air-dust mixtures provides a uniform spray of fuel in the space of the reactor, thus providing the best conditions for the reactions of gasification. The output of the syn-gas in the considered case is 2,35 m³/kg of fuel has a calorific value of 5,0 MJ/m³.

Keywords: numerical simulation, gasification of pulverized fuels, coal, self-oscillation, synthesis gas

Проведение натуральных экспериментов для исследования теплоэнергетических процессов в условиях современной экономики дело крайне дорогое и порой не всегда эффективное. Этим объясняется повышенный интерес инженеров к альтернативным методам исследования, к коим относятся теоретическое и численное математическое моделирование. Последнее наиболее перспективно для использования в практической деятельности по причине большей гибкости и способности решать широкий круг задач с достаточной точностью. Это в первую очередь связано с растущими в последние десятилетия вычислительными мощностями и активным развитием универ-

сальных программных продуктов, позволяющих с достаточной степенью точности, основываясь на численном решении подробных уравнений аэродинамики, химии и теплопереноса, исследовать различные сопряжённые явления и процессы [1]. Однако стоит признать, что совсем отказаться от физического эксперимента принципиально невозможно. Для любого класса задач необходима верификация используемой математической модели путём сопоставления расчётных данных с данными физического эксперимента. Более того, в зависимости от выбранной модели может потребоваться определение некоторых модельных параметров, которые в свою очередь возможно

определить только путём проведения физического эксперимента. Дополнительными преимуществами исследований методами численного моделирования, помимо существенного сокращения денежных затрат, являются высокая скорость и широта режимных и параметрических постановок. Ограничение по времени проведения исследования определяется исключительно располагаемыми вычислительными мощностями и постановкой решаемой задачи.

В настоящее время уже накоплен некоторый положительный опыт моделирования практических важных вопросов теплоэнергетики:

- расчёт динамики потоков у горелочного устройства, подбор оптимальных параметров конструкторских решений [3];
- моделирование горения в топочных камерах: прогнозирование полей температур и тепловых потоков в зоне реакций и количества образующихся вредных веществ [7];
- исследование динамики дисперсной фазы: конструкторские решения золоуловителей [8] и процессы горения пылевидного топлива [5];
- оценка уровня шлакоотложения на стенках топочной камеры [6];
- течения в каналах и проточных частях энергоустановок [4];

Проведение численного эксперимента особенно актуально при исследовании новых явлений и влияния каких-либо новых конструкторских решений в процессах подготовки и сжигания топлива. Так, для исследования процессов газификации пылевидного твёрдого топлива не обойтись без предварительного расчёта и поиска оптимального режима работы газификатора. В работах [9, 10] показан успешный опыт применения предварительного исследования процессов газификации угольной пыли на определённой конструкции газификатора при различных режимах его работы. Полученные расчётные значения по составу и калорийности синтез-газа с удовлетворительной точностью совпадают с результатами, полученными в ходе опытной эксплуатации установки.

В данной работе представлены результаты использования методов математического моделирования в исследовании нового способа подачи твёрдого пылевидного топлива в зону реакции газификатора, отличающегося высокой интенсивностью турбулентного смешения топлива и окислителя с одновременно относительно низкой выходной скоростью, обеспечивающей более длительное нахождение частиц топлива

в зоне реакции. Способ основан на явлении автоколебательного истечения из прямоугольного отверстия, перекрытого арочным элементом [2]. Данное течение характеризуется, во-первых, аномально высокой амплитудой колебаний, во-вторых, значительным увеличением интенсивности турбулентности потока и, наконец, снижением длины результирующего течения.

Постановка задачи

Эффективность использования синтез-газа во многом зависит от его калорийности, которая в свою очередь зависит от сорта используемого угля, выбранного режима газификации и конструктивных решений по реактору газификации. Используемое пылеугольное горелочное устройство будет в значительной степени определять его теплотехнические, экологические и потребительские качества. При использовании прямооточных или вихревых горелочных устройств в газификаторах достаточно сложно обеспечить одновременно долгое нахождение угольных частиц в зоне реакции и качественное смешение реагентов, участвующих в реакциях газификации. Во многом поэтому реакторы газификаторов, работающих на пылевидном топливе, имеют достаточно большие габариты. Применение предлагаемого в данной работе способа подачи пылевоздушной смеси посредством предлагаемого горелочного устройства, обеспечивающего «гашение» выходного потока пылевоздушной смеси одновременно с значительным увеличением интенсивности турбулентности потока, может позволить уменьшить габариты реактора газификатора, что в свою очередь снизит его стоимость без потери качества производимого синтез-газа.

Стоит отметить, что данное исследование носит достаточно академический характер, преследуя цель изучить принципиальную возможность использования нового вида автоколебательного течения для приложения к данной области энергетики.

В исследовании рассматривался условный реактор газификации, (рис. 1), с габаритами $1 \times 2 \times 4$ метра, с установленным сверху горелочным устройством, выполненным в виде простого прямоугольного отверстия, перекрытого арочным элементом (рис. 2). Размер прямоугольного выходного отверстия горелочного устройства составляет $0,1 \times 0,2$ м. Арочный элемент выполнен в полукруглой форме. Бункер подачи топлива имеет габариты $0,5 \times 0,5 \times 0,3$ метра.

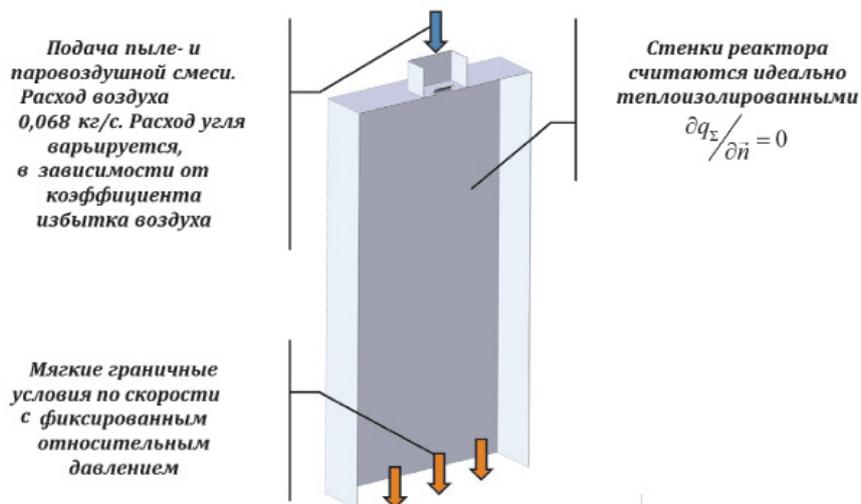


Рис. 1. Схема исследуемого реактора в продольном разрезе. Постановка граничных условий

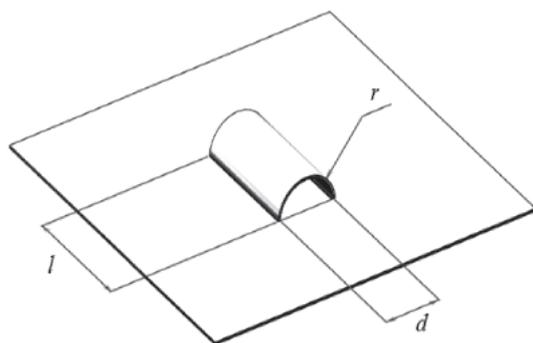


Рис. 2. Схема горелочного устройства. Прямоугольное отверстие, перекрытое полукруглым арочным элементом

Поскольку в реакторах газификации угольной пыли в потоке стенки реактора футеруются термостойким материалом, который в свою очередь перед запуском реактора активно прогревается, то стенки рассматриваемого реактора предполагались идеально теплоизолированными. В качестве приближения диаметр угольных частиц считался постоянным и равным 90 мкм. В качестве топлива рассматривается каменный уголь штата Юта, поскольку для данного вида угля имеются экспериментально определённые параметры реакций и он по составу в наибольшей степени схож с российским каменным углём (Кузнецкий марки Д), состав которого для сравнения представлен в табл. 1. Расход угольной пыли определяется из условия режима работы газификатора, который в свою очередь определяется коэффициентом избытка воздуха. Рассматриваются режимы с коэффициен-

том избытка воздуха от 0,3 до 0,5. Массовая доля пара в дутье варьируется от 5 до 15% по значению массового расхода воздуха.

Таблица 1
Сравнение состава каменных углей

	Utah bit. [9]	Кузнецкий кам. Д
Влажность гигроскопическая	6,7	4,5
Зольность	10,4	18,0
Доля летучих	43,5	40,5
Чистый углерод	39,4	37,0
Элементарный состав угля, % daf		
C	75,34	77,69
H	5,29	5,51
O	12,95	13,64
N	1,58	2,62
S	4,84	0,55
Теплота сгорания на сухую массу, МДж/кг	27,4	21,9

Математическая модель

Для расчёта турбулентных течений, возникающих в исследуемом пространстве реактора газификатора, в программном комплексе STAR-CCM+ численно решается система уравнений Навье – Стокса, осреднённых по Рейнольдсу (RANS), записанных в нестационарной постановке для несжимаемой жидкости. Для моделирования турбулентности используется квадратичная k-ε модель турбулентности, состоящая из двух дополнительных уравнений переноса для кинетической энергии турбулентности

и скорости её диссипации. Для моделирования переноса излучения используется модель дискретных ординат (DO) с рассмотрением более 100 угловых направлений. Учитывается влияние присутствия угольной пыли в пространстве реактора на перенос теплового излучения.

Процесс сжигания и газификации пылеугольного топлива рассматривается состоящим из следующих последовательно протекающих стадий:

- Сушка и прогрев угольной пыли. На этой стадии под действием внешнего теплового потока происходит испарение остаточной гигроскопической влаги.

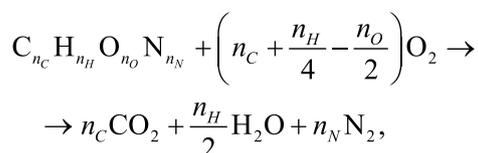
- Выход и сгорание летучих. На этой стадии также под действием внешнего теплового потока происходит процесс пиролиза твёрдого угля, в ходе которого образуются газообразные летучие горючие компоненты, которые, в свою очередь, при наличии окислителя воспламеняются и сгорают.

- Гетерогенные реакции горения и газификации твёрдого углистого остатка. После выхода летучих остаётся чистый углистый остаток, который трудно пиролизуется, но активно горит в твёрдой фазе и реагирует с водяным паром, образуя синтез-газ.

- Коксовый остаток. После всех стадий горения угля остаётся негорючий остаток, содержащий в основном негорючие минералы, состав которых определяется типом угля и его месторождением.

При расчёте реакций горения летучих в газовой фазе используется комбинированный подход диссипации вихрей (EDC) и конечной скорости реакции, рассчитываемой согласно закону Аррениуса. Параметры для расчёта скорости выхода летучих, скорости гетерогенных реакций горения и газификации определяются из опубликованных экспериментальных данных изучения конкретных сортов углей методами термогравиметрического анализа и микрокалориметрии [9].

Горение летучих описывается приближённой брутто-формулой

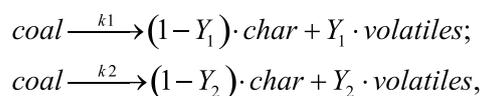


здесь формула молекул летучих определяется прежде всего из состава рассматриваемого угля. Параметры для расчёта скорости реакции, описываемой согласно закону Аррениуса, определены экспериментально [9] и равны

$$A = 2,119 \cdot 10^{11} \text{ 1/с};$$

$$E = 202,7 \text{ кДж/моль}.$$

Процесс пиролиза угольной пыли представлен в виде двух параллельно идущих реакций:



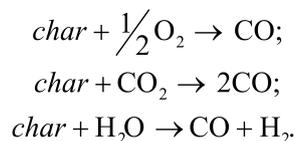
здесь k_1 и k_2 – скорости реакций первой и второй стадии соответственно; Y_1 и Y_2 – массовые стехиометрические коэффициенты. Параметры для расчёта скоростей реакций представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры реакций пиролиза угля [9]

	1 реакция	2 реакция
Y_i	0,1079	0,6384
A_r , 1/с	15336,33	$5,603 \cdot 10^{13}$
E_r , кДж/моль	30,09	79,87

Процесс горения и газификации представлялся тремя параллельно идущими гетерогенными реакциями:



Для рассматриваемого сорта угля были приняты параметры реакции, представленные в табл. 2. Параметры реакций горения и газификации угля представлены в табл. 3. В данных реакциях учитывается зависимость их скорости от температуры, которая во всех случаях линейна.

Таблица 3

Параметры реакций горения и газификации угля [10]

	E_a , кДж/моль	A , 1/с
$char + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$	92,9	2,3
$char + H_2O \rightarrow CO + H_2$	147,1	1,33
$char + CO_2 \rightarrow 2CO$	130,1	3,149

Результаты

Для создания эффективного пылеугольного горелочного устройства использовано гидродинамическое явление автоколебательного истечения двух встречно соосных потоков. Суть явления заключается в возникновении мощного автоколебательного процесса при истечении воздуха из отверстия прямоугольной формы, перекрытого арочным элементом [2]. Форма арочного элемента может быть как полукруглой, так и прямоугольной. Основная особенность предложенного метода заключается в аномально высокой амплитуде возникающих колебаний, а также в высокой интенсивности турбулентности потока, особенно важной в процессах сжигания топлив, способствующей быстрому смешению горючих компонентов с окислителем.

Один из главных параметров, влияющих на полноту протекания реакций, это время присутствия угольных частиц в зоне реакций. Длительное присутствие в зоне реакций увеличивает вероятность полного протекания процесса газификации топлива. На рис. 3 показано различие траекторий движения частицы в реакторе при простой прямооточной подаче пылевоздушной смеси и траекторий движения с использованием предлагаемой кон-

струкции горелочного устройства. Стоит отметить, что при использовании предлагаемой конструкции выходного отверстия время присутствия частицы в зоне реакций газификации увеличилось в 6 раз, с 0,4 до 2,5 секунд.

Сравнение распределений температуры в пространстве реактора представлено на рис. 4. Для прямооточной подачи течение развивается как струйное, а факел имеет достаточно протяжённую форму, находясь на достаточном удалении от горелочного устройства, температура при этом распределена в пространстве существенно неравномерно. Иная форма факела образуется при использовании предлагаемого устройства. Течение характеризуется более равномерным распределением температуры в пространстве реактора, а также близким расположением фронта пламени к выходному отверстию горелки.

Отметим, что при равномерном распределении частиц в реакторе создаются благоприятные условия для интенсивного протекания реакций газификации. В табл. 4 представлено сравнение составов синтез-газа, образующегося при различных режимах работы реактора, отличающихся коэффициентом избытка воздуха и массовым содержанием пара в паровоздушном дутье.

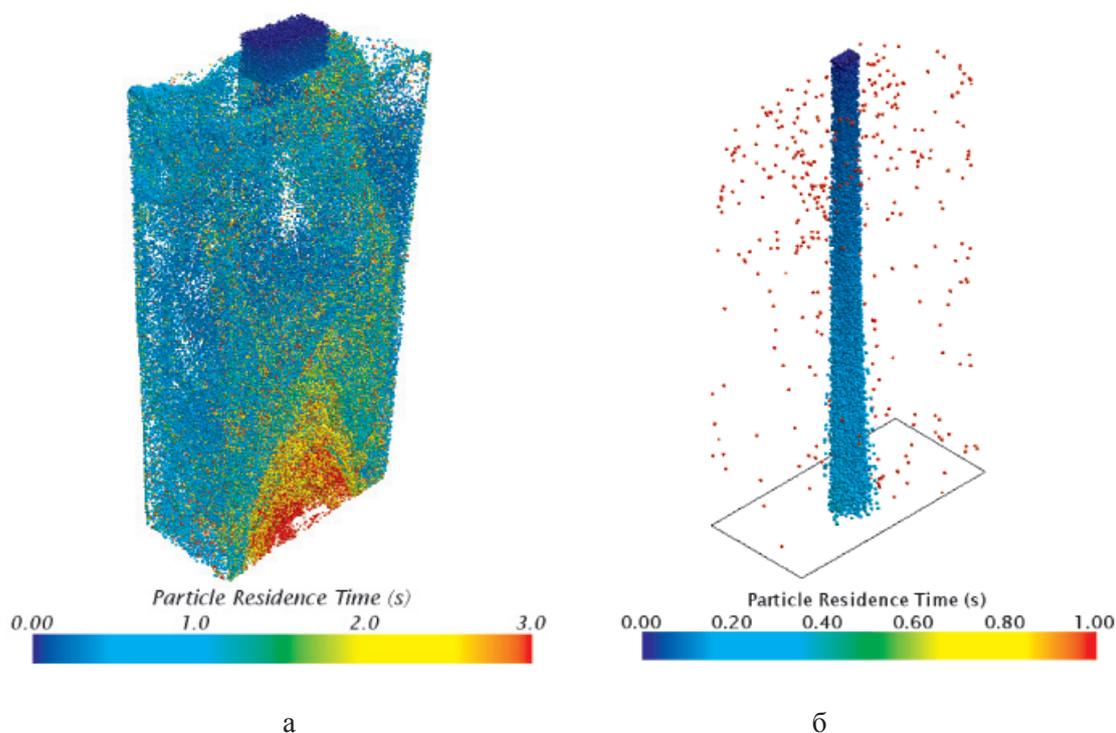


Рис. 3. Распределение угольных частиц в пространстве реактора: а – автоколебательное истечение; б – прямооточное истечение

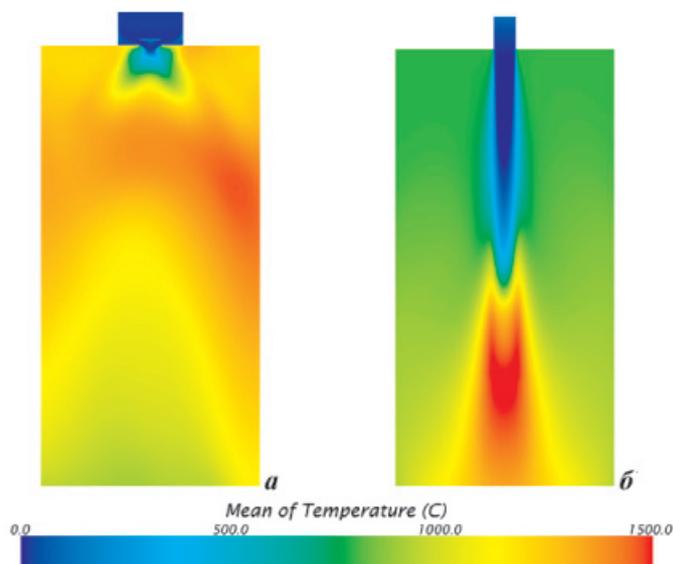


Рис. 4. Сравнение средних полей температуры при различных способах подачи топлива: а – автоколебательное истечение; б – прямоточное истечение

Таблица 4

Состав и низшая теплота сгорания получаемого сухого синтез-газа

Состав синтез-газа	CO, об. %	H ₂ , об. %	CO ₂ , об. %	N ₂ , об. %	Теплота сгорания, МДж/м ³
Коэффициент избытка воздуха – 0,3	29,87	12,10	1,20	56,82	5,084
Массовая доля пара в дутье – 0,05					
Коэффициент избытка воздуха – 0,3	23,71	17,15	4,37	54,76	4,851
Массовая доля пара в дутье – 0,10					
Коэффициент избытка воздуха – 0,3	21,48	19,96	5,71	52,85	4,872
Массовая доля пара в дутье – 0,15					
Коэффициент избытка воздуха – 0,4	27,71	8,95	2,87	60,47	4,470
Массовая доля пара в дутье – 0,05					
Коэффициент избытка воздуха – 0,4	22,40	13,68	5,13	58,79	4,310
Массовая доля пара в дутье – 0,10					
Коэффициент избытка воздуха – 0,4	18,25	18,86	6,88	56,00	4,345
Массовая доля пара в дутье – 0,15					
Коэффициент избытка воздуха – 0,5	24,58	7,81	4,46	63,15	3,951
Массовая доля пара в дутье – 0,05					
Коэффициент избытка воздуха – 0,5	22,01	11,92	5,65	60,42	4,071
Массовая доля пара в дутье – 0,10					
Коэффициент избытка воздуха – 0,5	15,32	18,27	7,33	57,16	3,910
Массовая доля пара в дутье – 0,15					

Видно, что использование горелочного устройства предлагаемой конструкции позволяет эффективно газифицировать пылеугольное топливо и получать низкокалорийный синтез-газ, который в дальнейшем может использоваться в ПГУ и ГТУ. Калорийность получаемого сухого синтез-газа варьируется от 3,9 до 5,0 МДж/м³ в зависи-

мости от режима работы реактора газификации. Видно, что оптимальный режим из многообразия рассмотренных в данной работе соответствует коэффициенту избытка воздуха 0,3 и массовой доли пара в дутье 5%, для которого выход сухого синтез-газа составляет 2,35 м³/кг топлива. Для сравнения укажем, что в системе газификации

компании «Shell» на парокислородном дутье и при использовании каменного угля выход сухого синтез-газа составляет 2,08 нм³/кг, а в системе компании «Техасо» также для парокислородного дутья и того же вида угля выход синтез-газа составляет 2,1 нм³/кг [2]. Выгодное отличие от известных систем заключается в отсутствии необходимости организации высокого давления в реакторе: в данной работе давление в реакторе мало отличается от атмосферного, тогда как в представленных сравнительных примерах давление поддерживается выше 2,5 МПа.

Заключение

С использованием методов численного моделирования и с помощью программного комплекса STAR-CCM+ были проведены исследования динамики процессов газификации. Проведено сравнение динамики пылеугольного факела для простой прямоточной подачи пылевоздушной смеси и для новой конструкции выходного отверстия горелочного устройства. Сравнение показало:

- при использовании новой предлагаемой конструкции горелочного устройства наблюдается более равномерное распределение температуры и угольной пыли в пространных реактора;
- время пребывания частиц в зоне реакций увеличилось в 6 раз, с 0,4 до 2,5 с;
- калорийность получаемого синтез-газа для различных режимов работы газификатора варьируется в пределах от 3,9 до 5,0 МДж/м³.

Показана принципиальная возможность подачи пылевидного топлива в реактор с использованием эффекта автоколебательного процесса при истечении из прямоугольного отверстия, перекрытого арочным элементом.

Однако остаются открытыми вопросы конструктивного исполнения и интеграции в существующие объекты энергетики исследованного решения. Отмечается достаточно близкое расположение фронта пламени к выходному отверстию горелочного устройства. Выявленные особенности предлагаемой конструкции следует учитывать в последующих разработках.

Список литературы

1. Абрамов В.В. Современные природоохранные технологии в электроэнергетике: Информационный сборник / под общ. ред. В.Я. Путилова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 388 с.
2. Бурцев С.И., Денисихина Д.М. Расчётное исследование течений, формирующихся при истечении воздуха из прямоугольных отверстий, перекрытых аркой // Теоретические основы теплогоснабжения и вентиляции: материалы Междунар. науч.-тех. конф. – М., 2005.
3. Гешева Е.С., Литвинов И.В., Шторк С.И., Алексеенко С.В., Анализ аэродинамической структуры течения в моделях вихревых горелочных устройств // Теплоэнергетика. – 2014 – № 9. – С. 33–41.

4. Скороспелов В.А., Турук П.А., Чёрный С.Г., Шаров, С.В., Численное моделирование во всей проточной части гидротурбины // Труды международной конф. RDAMM-2001. – 2001. – т. 6, ч. 2. – С. 570–584.

5. Abani N., Ghoniem A. Large eddy simulation of coal gasification in an entrained flow gasifier // Fuel, vol. – 2013. – № 104. – P. 664–680.

6. Chen L., Ghoniem A. Development of a three-dimensional slag flow model for coal combustion and gasification // Fuel. – 2013. – Vol. 113. – P. 357–366.

7. Cho C.H., Baek G.M., Sohn C.H., Cho J.H., Kim H.S. A numerical approach to reduction of NOx emission from swirl premix burner in a gas turbine combustor // Applied Thermal Engineering. – 2013. – Vol. 59. – P. 454–463.

8. Shaaban S. Numerical optimization and experimental investigation of the aerodynamic performance of a three-stage gas–solid separator // Chemical Engineering Research and Design. – 2011. – Vol. 89. – P. 29–38.

9. Vascellari M., Arora R., Pollack M., Hasse C., Simulation of entrained flow gasification with advanced coal conversion submodels. Part 1: Pyrolysis // Fuel. – 2013. – Vol. 113. – P. 654–669.

10. Vascellari M., Arora R., Hasse C., Simulation of entrained flow gasification with advanced coal conversion submodels. Part 2: Char conversion // Fuel. – 2014. – Vol. 118. – P. 369–384.

References

1. Abramov V.V. Sovremennyye prirodoohrannyye tehnologii v jelektrojenergetike: Informacionnyj sbornik / pod obshh. red. V.Ja. Putilova. M.: Izdatel'skij dom MJEI, 2007. 388 p.

2. Burcev S.I., Denisihina D.M. Raschjotnoe issledovanie techenij, formirujushihhsja pri istechenii vozduha iz prjamougol'nyh otverstij, perekrytyh arko // Teoreticheskie osnovy teplogazosnabzhenija i ventiljacii: materialy Mezhdunar. nauch.-teh. konf. M.. 2005.

3. Gesheva E.S., Litvinov I.V., Shtork S.I., Alekseenko S.V., Analiz ajerodinamicheskoj struktury techenija v modeljah vihrevyh gorelochnyh ustrojstv // Teplojenergetika. 2014 no. 9. pp. 33–41.

4. Skorospelov V.A., Turuk P.A., Chjornyj S.G., Sharov, S.V., Chislennoe modelirovanie vo vsej protochnoj chasti gidroturbiny // Trudy mezhdunarodnoj konf. RDAMM-2001. 2001. t. 6, ch. 2. pp. 570–584.

5. Abani N., Ghoniem A. Large eddy simulation of coal gasification in an entrained flow gasifier // Fuel, vol. 2013. no. 104. pp. 664–680.

6. Chen L., Ghoniem A. Development of a three-dimensional slag flow model for coal combustion and gasification // Fuel. 2013. Vol. 113. pp. 357–366.

7. Cho C.H., Baek G.M., Sohn C.H., Cho J.H., Kim H.S. A numerical approach to reduction of NOx emission from swirl premix burner in a gas turbine combustor // Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 59. pp. 454–463.

8. Shaaban S. Numerical optimization and experimental investigation of the aerodynamic performance of a three-stage gas–solid separator // Chemical Engineering Research and Design. 2011. Vol. 89. pp. 29–38.

9. Vascellari M., Arora R., Pollack M., Hasse C., Simulation of entrained flow gasification with advanced coal conversion submodels. Part 1: Pyrolysis // Fuel. 2013. Vol. 113. pp. 654–669.

10. Vascellari M., Arora R., Hasse C., Simulation of entrained flow gasification with advanced coal conversion submodels. Part 2: Char conversion // Fuel. 2014. Vol. 118. pp. 369–384.

Рецензенты:

Бурцев С.И., д.т.н., профессор, управляющий партнер ЗАО «Бюро техники», г. Санкт-Петербург;

Дацюк Т.А., д.т.н., профессор, заведующая кафедрой строительной физики и химии, СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург.

Работа поступила в редакцию 16.02.2015.