УДК 662.76

# ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕРСИИ ТОПЛИВ МЕТОДОМ ТГА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГАЗИФИКАЦИИ ЧАСТЬ 2: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

**Абаимов Н.А., Рыжков А.Ф.**

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия*

Исследование проведено при финансовой поддержке молодых ученых УрФУ в рамках реализации программы развития УрФУ, а так же в рамках выполнения Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (госконтракт № 14.516.11.0043 от 2013 г.).

## АННОТАЦИЯ

В работе представлено численное моделирование горизонтального циклонного реактора низкотемпературной термохимической конверсии бурых углей. Проведена верификация встроенной аэродинамической модели ANSYS CFX по данным, полученным на экспериментальной установке. Осуществлена модернизация исходной установки и проведён сравнительный анализ параметров работы и составов получаемых газов двух конструкций. Выполнена оптимизация расположения патрубка подвода вторичного воздуха модернизированной установки.

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе развития энергетических технологий появилось несколько принципиально разных способов сжигания топлива, основанных на организации горения топлива в слое, в факеле и в циклонной камере. Циклонные топки, благодаря особенностям вихревой аэродинамики, позволяют достигать наибольших теплонапряжений, в факельных топках вихревой эффект носит лишь вспомогательный характер. Данное достоинство циклонных установок позволяет создавать агрегаты небольших размеров необходимой мощности, что делает их весьма перспективными для малой и средней энергетики.

В настоящее время циклонный принцип используется как в энергетических, так и в технологических установках. Его применение оказывается перспективным в растопочных пылеугольных горелках и установках частичной газификации [1]. В газификаторах время пребывания твёрдых частиц топлива в активной зоне является одним из определяющих параметров, поэтому циклонная аэродинамическая структура здесь находит себе адекватное применение. Чтобы подчеркнуть актуальность данной темы, стоит напомнить про достоинства газификации твёрдого топлива в целом. Технологии газификации твёрдого топлива позволяют разрешить ряд принципиальных проблем современной энергетики:

- сокращение вредных выбросов («чистое» использование угля);
- расширение использования местной топливной базы;
- снижение затрат на дорогостоящие виды топлива (мазут, газ).

Экспериментальные исследования в этой области требуют крупных капитальных и трудовых затрат, ввиду чего, для проведения основного массива исследований, целесообразно использовать возможности математического моделирования для проработки данной проблемы.

Целью работы является создание компактного низкотемпературного реактора, предназначенного для термохимической подготовки и частичной газификации угольной пыли.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛОННОГО РЕАКТОРА В ПАКЕТЕ ANSYS CFX 14.5

В качестве исходной установки использовалась конструкция, разработанная в УрФУ (рис. 1, а) для термоподготовки топлива[1]. Для исследования работы установки была создана трёхмерная модель рассчитываемого реактора (рис. 1, б). На основании данных, полученных в результате моделирования, и учитывая конструктивные особенности исходной установки, была разработана и также смоделирована изменённая конструкция реактора для частичной газификации топлива (рис. 1, в).

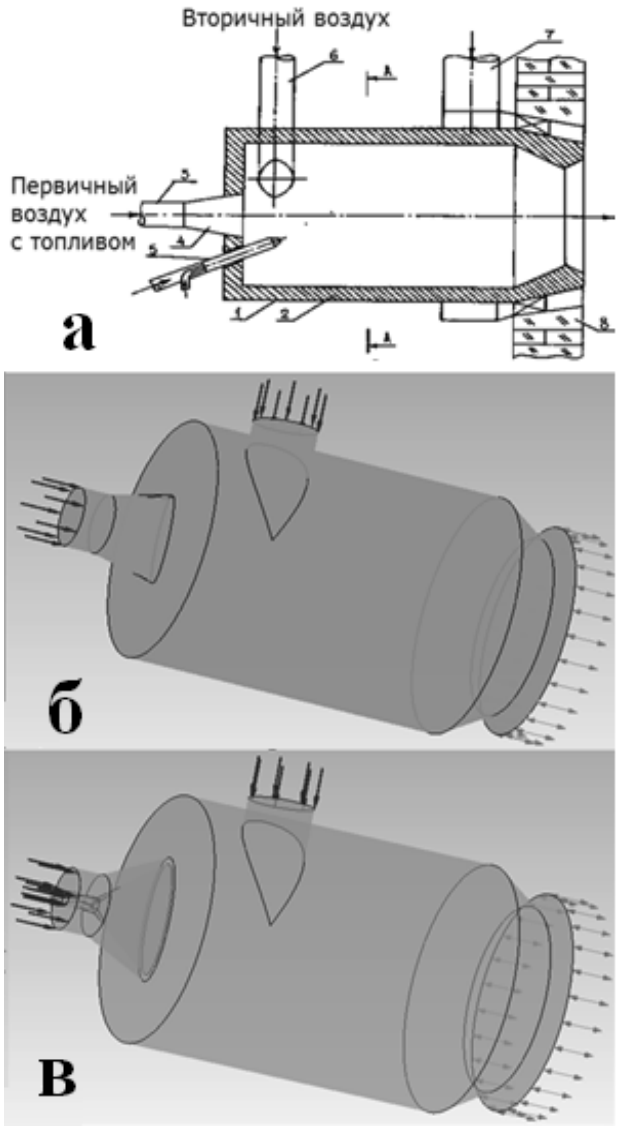


Рис.1 Циклонный реактор. а) конструкция реактора по патенту [1]; б) трёхмерная модель исходной конструкции; в) трёхмерная модель модернизированной конструкции.

Аэродинамика установки описывалась моделью, верифицированной по экспериментальным данным [2]. Наиболее трудоёмким этапом моделирования является задание граничных условий, потоков и физико-химических взаимодействий, поэтому опишем их подробнее. Характеристики потоков сведены в таблицу 1.

Таблица 1.
Характеристики потоков.

| Поток | Массовый расход, кг/с | Температура, °С |
|---|---|---|
| Первичный воздух | 0,3 | 100 |
| Вторичный воздух | 1,0 | 350 |
| Топливо | 0,5 | 100 |

Уравнения моделируемых гетерогенных химических реакций процесса имеют вид:

$C + O_2 = CO_2$, DH = -404.7 кДж/моль,

$C + H_2O = CO + H_2$, DH = 118.5 кДж/моль,

$C + CO_2 = 2\ CO$, DH = 159.9 кДж/моль.

Гомогенные реакции:

$H_2 + 0.5\ O_2 = H_2O$, DH = -241 кДж/моль,

$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$, DH = -801.1 кДж/моль,

$CO + 0.5\ O_2 = CO_2$, DH = -283 кДж/моль,

$CO + H_2O = CO_2 + H_2$, DH = -42.3 кДж/моль.

Скорость гетерогенных реакций (V) была описана выражением: $V = K \cdot \exp(-T_a/T) \cdot Cg \cdot A$,

где K – предэкспоненциальный фактор, м/с; $T_a$ – температура активации, K; T – температура частиц, K; Cg – концентрация реагирующего газа у поверхности частиц, кг/м$^3$; A – удельная поверхность частиц, м$^2$/кг [3].

Диапазон и величина значений K и $T_a$ для гетерогенных реакций приводятся в таблице 2, коэффициент A изменяется в пределах 1000-10000 м$^2$/кг и до 100000 м$^2$/кг.

Таблица 2.
Значения предэкспоненциального фактора и температуры активации [3].

| Реакция | K, м/с | $T_a$, K |
|---|---|---|
| $C + O_2 = CO_2$ | $1.3\text{-}15 \cdot 10^8$ | 19231-38462 |
| | $1.3 \cdot 10^8$ | 25000 |
| $C + H_2O = CO + H_2$ | $5.0\text{-}20 \cdot 10^4$ | 14423-24039 |
| | $5.0 \cdot 10^4$ | 16827 |
| $C + CO_2 = 2\ CO$ | $1.17\text{-}59 \cdot 10^5$ | 25601-34135 |
| | $1.17 \cdot 10^5$ | 29808 |

Численное моделирование процесса термохимической конверсии кокса проводится в пакете инженерных прикладных программ ANSYS 14.5 CFX. Скорость гетерогенных реакций определяется при помощи опции «Particle User Routine». Другие возможные способы задания скорости гетерогенной реакции: «Mass Arrhenius», «Field Char Oxidation Model», «Gibb Char Oxidation Model» не отвечают требованиям модели газификации. Опция «Mass Arrhenius» предполагает использование гомогенных реагентов. Два другие способа требуют выбора кислорода в качестве окислителя.

Предварительно разогретые до 700-900°С стенки обмуровки учитывались заданием начальной температуры стенок камеры 800°С. При этом коэффициент теплопередачи через стенки обмуровки был принят равным 3.6 Вт/(м$^2$·К), а коэффициент излучения составлял 0.9. На выходном сечении реактора задавалось открытое пространство с атмосферным давлением и температурой окружающей среды 25° С.

## ВЕРИФИКАЦИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Особенности аэродинамики потоков для циклонных камер являются ключевым моментом. В этой связи, математическая модель была верифицирована с использованием данных, полученных на экспериментальной установке для исследования аэродинамики изотермической циклонной (циклонно-слоевой) камеры (рис. 2) [2].

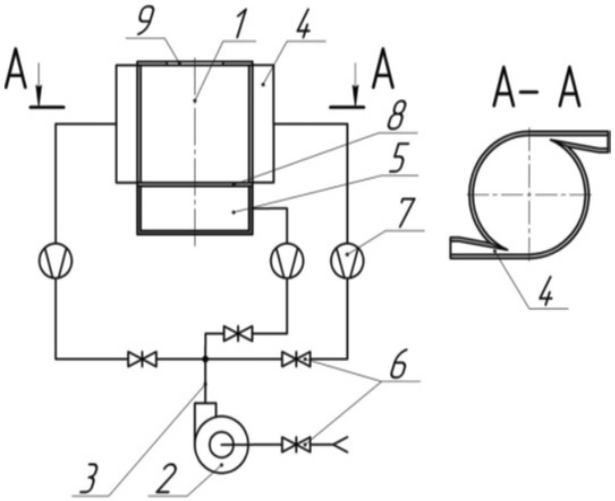


Рис.2 Экспериментальная установка для исследования аэродинамики изотермической циклонной (циклонно-слоевой) камеры [2]. 1 – циклонная камера, 2 – дутьевой вентилятор, 3 – воздуховоды, 4 – сопла тангенциального ввода воздуха, 5 – подрешеточный короб, 6 – регулировочные шиберы, 7 – расходомерные шайбы, 8 – нижняя стенка камеры (газораспределительная решетка), 9 – выходное отверстие.

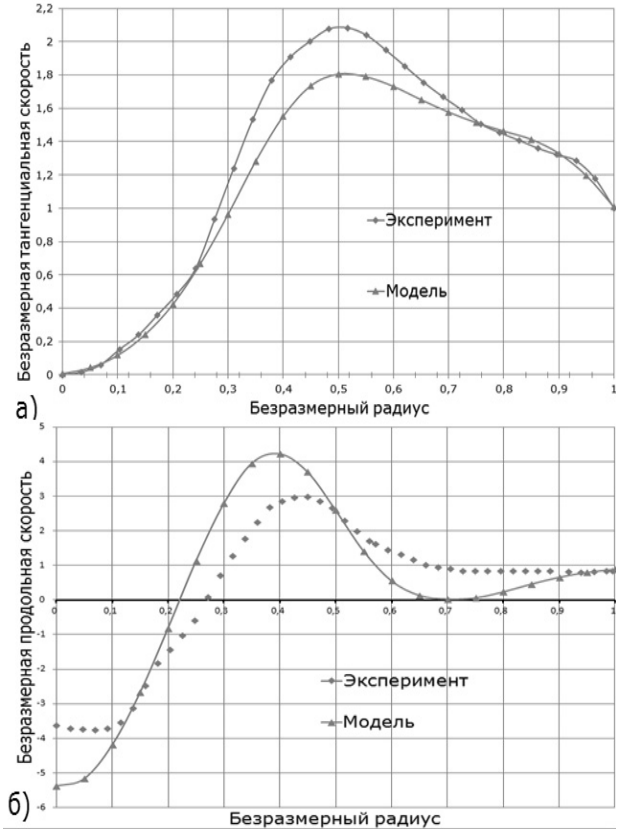


Рис.3 Сравнение безразмерных характеристик на радиусе в верхнем сечении камеры (0,9 Н). а) безразмерная тангенциальная составляющая скорости; б) безразмерная продольная составляющая скорости.

Параметры при моделировании принимались в соответствии с данными, полученными на экспериментальной установке.

На рис. 3 приведены графики сравнения величин полученных на экспериментальной установке и математической модели. Эти данные свидетельствуют о качественной схожести аэродинамик модели и установки. Количественные же значения имеют некоторые расхождения, но, в рамках данной задачи, их можно считать несущественными.

В дальнейшем планируется более глубокая проработка вопроса верификации аэродинамической модели ввиду их значимости для всех процессов, происходящих в циклонной камере.

## АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В исходной установке поток первичного воздуха не имеет на своём пути никаких конструктивных элементов, препятствующих его прямолинейному движению на выход из камеры. Вследствие этого большая часть частиц твёрдого топлива так и не уносится вторичным воздухом к периферии реактора, существенно сокращая общее время пребывания топлива в установке (рис. 4, а).

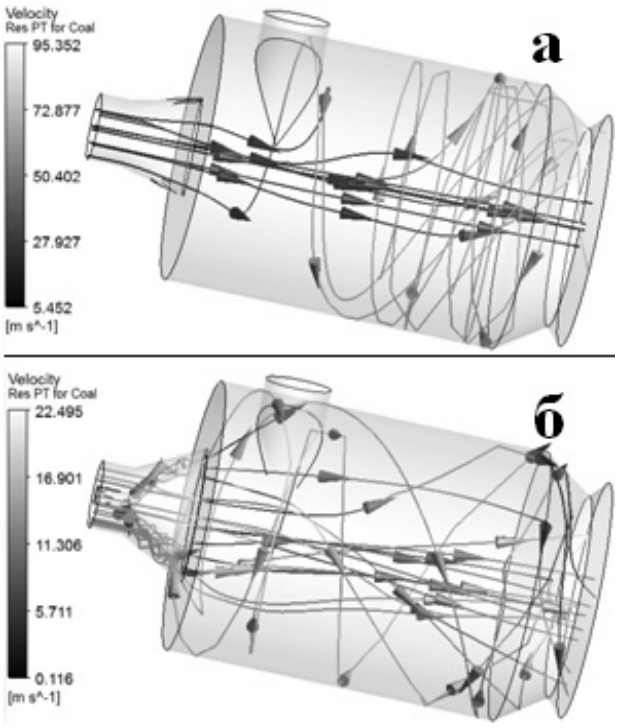


Рис.4 Траектория и скорости движения частиц твёрдого топлива. а) исходная конструкция реактора; б) модернизированная конструкция.

Включение в исходную конструкцию реактора грибка-рассекателя имела целью изменение траектории движения первичного потока воздуха и аэродинамики циклонной камеры в целом. В частности, рассекатель разрушает аксиальный поток первичного воздуха и перенаправляет его к периферии камеры, тем самым удлиняет траекторию движения частиц твёрдого топлива и увеличивает их время пребывания в активной зоне реактора (рис. 4, б).

Температура является одной из важнейших характеристик теплоэнергетических установок, определяя режим их работы (рис. 5, а).

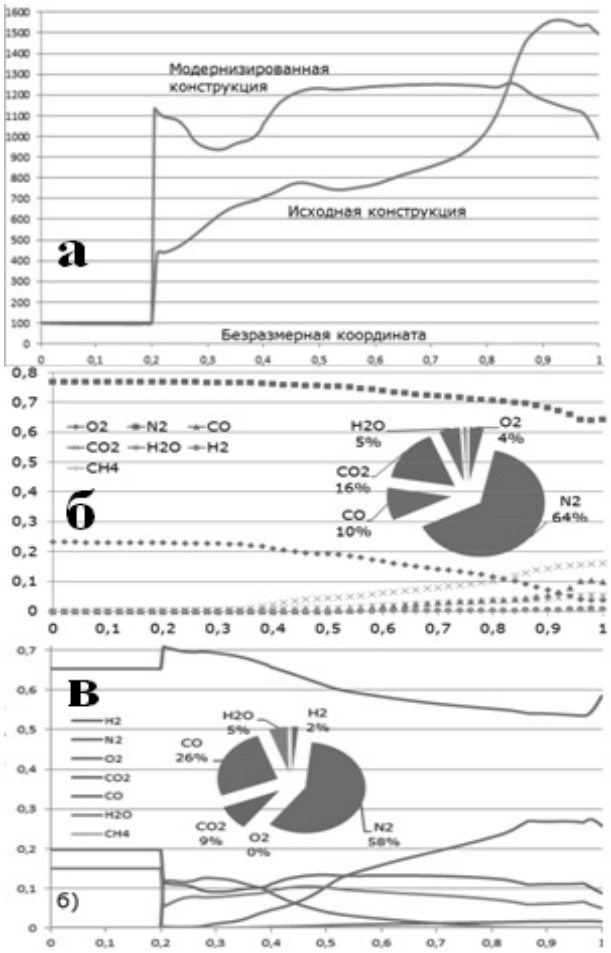


Рис.5 Параметры по длине реактора и на выходе из него. а) средняя температура; б) концентрации (масс.) газов в исходной конструкции ; в) в модернизированной конструкции.

Распределение средних температур по длине реактора исходной конструкции демонстрирует умеренный рост температур от начала камеры (безразмерная координата x=0.2) до начала сужения (x=0.8). В области пережима (x=0.8-1) наблюдается резкий скачок температур, обусловленный скоплением частиц топлива около сужения, где они интенсивно горят.

Средние температуры газов модернизированной конструкции лежат в низкотемпературном диапазоне (от 900°C до 1300°C), что удовлетворяет условиям твёрдого шлакоудаления. Область подвода вторичного воздуха (x=0.3-0.4) имеет характерное снижение температур. Частицы топлива, попадающие в периферийную область камеры до этого падения температур (x=0.2-0.3) образуют зажигательный пояс со средними температурами от 1000°C до 1100°C.

Графики распределения средних концентраций компонентов по длине реактора и состав получаемого газа изображены на рисунке 5 (б, в). В исходной конструкции кислородная зона распространяется на всю длину установки. В модернизированной конструкции она заканчивается на 0.7-0.8 длины реактора, благодаря чему на последней четверти камеры протекают восстановительные процессы. Газ, генерируемый в изменённой конструкции, содержит в два раза больше водорода, в два с половиной раза CO и на две трети больше метана, чем газ исходной конструкции. Это повышает теплоту сгорания газа более чем в 2.5 раза: с 2 МДж/кг до 5.1 МДж/кг. Соотношение тепла в газе к теплу в коксе меняется с 1:4 до 1:2 соответственно. Данный параметр особенно важен при использовании реактора в схемах двутопливных (генераторный газ и кокс) парогазовых установок.

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПАТРУБКА ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО ПОДВОДА ВОЗДУХА

Аэродинамическая структура потока в циклонных камерах определяет все физико-химические процессы, протекающие в ней, поэтому множество исследователей занимаются оптимизацией данной структуры. Одним из важнейших параметров оптимизации, как отмечал Кнорре Г.Ф., является местоположение патрубка подвода тангенциального воздуха. Многие исследователи занимались данным вопросом, но трудоёмкость и дороговизна физических экспериментов в этой области затрудняли проведение серьёзных исследований.

Использование современных программных комплексов, таких как ANSYS CFX 14.5 позволяют быстро и точно проводить расчёт интересующих нас конструкций. В данной работе исследуемым параметром являлось расстояние от заднего днища циклона до оси цилиндрического патрубка подвода тангенциального воздуха.

Рассматривались 3 ключевых позиции расположения патрубка: у входа в циклон (№1), в середине (№3) и у выхода (№5); и 2 промежуточных – между входным и средним (№2), между средним и выходным (№4). Интенсификация процесса оценивалась по массовой концентрации CO, как основной составляющей получаемого газа, и по распределению температур на выходе из реактора.

Графики распределения средних температур в различных конструкциях (рис. 6, а) имеют характерные сходства: средние температуры не превышают 1300°C, а в области подвода вторичного воздуха имеется снижение температуры.

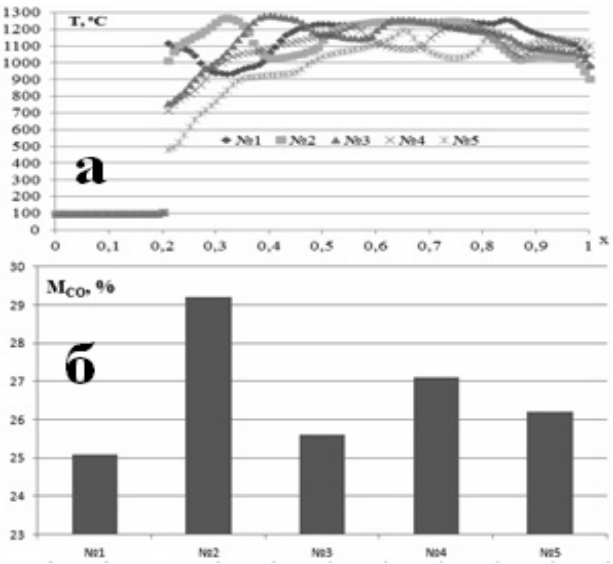


Рис.6 Распределение температур (а) и концентрация (масс.) CO в получаемом газе (б) в различных конструкциях.

Основным же параметром для сравнения считаем массовую концентрацию CO ($M_{CO}$) на выходе из реактора (рис. 6, б), так как этот

компонент является основным горючим газом в получаемом составе (доля водорода и метана существенно ниже).

Содержание CO на выходе из оптимизированной конструкции №2 является наибольшим, и составляет 29.2 %. Это обуславливается с одной стороны, хорошо развитым зажигательным поясом (он успевает максимально развиться, в отличие от №1), а с другой – достаточным временем пребывания частиц топлива для интенсивного реагирования.

Таким образом, модернизировав исходную конструкцию предтопка, ближе к выходу из реактора появилась восстановительная зона, благодаря наличию которой существенно возросла теплотворная способность генераторного газа (более чем в 2.5 раза). Оптимизация конструкции, в свою очередь, дополнительно увеличила теплоту сгорания получаемого газа на 20%, что в данном случае является существенным прогрессом.

Направления дальнейших исследований: поиск оптимального количества моделируемых частиц топлива; рассмотрение реакций, наиболее полно описывающих газификацию.

## ВЫВОДЫ

1. Конструирование реактора термохимической конверсии по типу низкотемпературного циклонного предтопка позволяет увеличить время пребывания частиц угольной пыли при сохранении малой длины и стабилизировать горение факела за счет организации обратных токов к его корню.

2. Данные верификации свидетельствуют о качественной схожести аэродинамик модели и реальной установки. Количественные же значения имеют некоторые расхождения, но, в рамках данной задачи, их можно считать несущественными.

3. В модернизированной конструкции кислородная зона заканчивается на 0.7-0.8 длины реактора, благодаря чему на последней четверти камеры протекают восстановительные процессы, чего не наблюдалось в исходной конструкции.

4. Газ, генерируемый в изменённой конструкции, содержит в два раза больше водорода, в два с половиной раза CO и на две трети больше метана, чем газ исходной конструкции. Это повышает теплоту сгорания газа более чем в 2.5 раза: с 2 МДж/кг до 5.1 МДж/кг. Соотношение тепла в газе к теплу в коксе меняется с 1:4 до 1:2 соответственно.

5. Содержание CO на выходе из оптимизированной конструкции является наибольшим, и составляет 29.2 %. Оптимизация конструкции дополнительно увеличила теплоту сгорания получаемого газа на 20%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка растопочной пылеугольной горелки. Берг Б.В., Батхишиг А., Вальцев Н.В. и др. // Электрические станции, № 10, 2012, С. 22-27.

   Development of the burner pulverized coal burner. Berg B.V., Bathishig A. Valzev N.V. and others // Power stations, № 10, 2012, Pp. 22-27.

2. Пицуха Е.А., Теплицкий Ю.С., Бородуля В.А., Волчков Э.П., Дворников Н.А., Лукашов В.В. Исследование структуры закрученных течений в циклонной камере при различных условиях ввода и вывода газа / // ИФЖ. – 2012. – Т.85. – № 2. – С. 305 – 317.

   Pitsuha E.A., Teplitsky Y.S., Borodulya V.A., Volchkov E.P., Dvornikov N.A., Loukashov V.V. Investigation of the structure of swirling flow in the cyclone chamber under different conditions of input and output gas // Journal of Engineering Physics. - 2012. - Vol.85. – no. 2. - Pp. 305 - 317.

3. Физико-математическое моделирование термохимической конверсии при газификации. Махаев А. Д., Рыжков А. Ф., Вальцев Н. В. и др. // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сборник научных статей. №2 (10). - Киев: “НПВК Триакон”, 2012. С. 295-304.

   Physical and mathematical modeling of thermo-chemical conversion in gasification. Makhaev A.D., Ryzhkov A.F., Valzev N.V. and others // *Symp.* Modern science: research, ideas, results, and technology. no. 2 (10). - Kiev: “NPVK Triakon,” 2012. S. 295-304.