

Исследование конструктивно-компоновочных параметров циклонных предтопок для сжигания кавитационного жидкоугольного топлива*

Ю.В. ОВЧИННИКОВ, Ф.А. СЕРАНТ, А.И. ЦЕПЕНОК

Технологии использования в теплотехнике и энергетике твердых топлив (угли, антрациты) менее совершенны, чем технологии использования более дорогих жидких котельно-печных и моторных топлив (углеводороды). Сегодня в мире разрабатываются проекты переработки угольных топлив в топлива, аналогичные по технологическим свойствам углеводородным. Альтернативным вариантом получения жидких топлив из углей является технология Новосибирского государственного технического университета получения кавитационного жидкоугольного топлива (КЖТ). В основе получения КЖТ лежит последовательность процессов дробления твердого топлива в высокоскоростных мельницах (дезинтеграторах) с последующим измельчением до субмикронного уровня в кавитационном поле гидромеханического кавитатора. В результате получается активированная жидкая система с высокой концентрацией ультратонкодисперсной твердой фазы, которая представляет собой водоугольное топливо новейшей модификации. Один из возможных вариантов использования КЖТ – его сжигание котлах, оборудованных циклонными предтопками.

Исследование сжигания КЖТ в ЦП осуществлялось с помощью математического моделирования при параллельном экспериментальном сопровождении на специально спроектированном и построенном исследовательском стенде. В результате исследований была разработана методика расчета конструктивно-компоновочных параметров технологически рационального варианта ЦП для сжигания КЖТ.

Ключевые слова: кавитационное жидкоугольное топливо, циклонный предтопок, конструктивно-компоновочные параметры, ANSYS Fluent.

ВВЕДЕНИЕ

При анализе современного ТЭК обращает на себя внимание, что технологии угледобычи и углепереработки значительно отстают по своему уровню от углеводородного топлива. Инновационный переход к шестому технологическому укладу в этой области настоятельно требует новых идей и, соответственно, новых технологий, способных обеспечить технологический прорыв для Углепрома.

Вместе с тем, углеводородное топливо обладает рядом преимуществ по сравнению с угольным топливом. В разработках в мире в настоящее время находится не менее двадцати проектов получения из угля тяжелого жидкого котельно-печного и газового топлива. Общим для этих проектов является многостадийность технологических процессов, использование высоких температур и давлений. Одним из альтернативных инновационных проектов в углепереработке является получение и использование водоугольного топлива, особенно его последней модификации, разработанной в НГТУ.

1. АКТУАЛЬНОСТЬ КАВИТАЦИОННОГО ЖИДКОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Технология КЖТ использует новые физические принципы воздействия на вещество (ударно-сдвиговая деформация, кавитация). Активированная топливная система имеет максимальные размеры частиц твердой фазы на уровне коллоидных 0...4 мкм [1]. Это топливо по своим технологическим качествам превосходит остальные виды ВУТ. Применение в КЖТ

* Статья получена 03 июня 2013 г.

сверхчистых углей ($A' < 1\%$) позволяет уже сегодня получить высококачественное топливо для энергетических газовых турбин (разработки фирм Японии и США [2]).

Горение КЖТ, как и ВУТ, отличается от горения жидкого углеводородного топлива, поэтому исследование процессов воспламенения и сжигания КЖТ является весьма актуальной проблемой.

Лабораторные исследования показали, что реакционная способность КЖТ переменна и в процессе сжигания капли топлива изменяется от очень низких значений, характерных для трудных для сжигания углей, и до высоких, характерных для высокорективных ультрадисперсных углей [5].

Кривая константы горения КЖТ в области $t > 235^\circ\text{C}$ практически совпадает с аналогичной кривой ультрадисперсного угля. В этих условиях горение пористого твердого остатка является горением высокорективного топлива (как ультрадисперсный уголь).

Циклонный предтопок

В 2011–2012 гг. были выполнены экспериментальные исследования воспламенения и горения КЖТ циклонном предтопке. Одновременно с экспериментами проводилось численное моделирование процессов. Экспериментальный образец ЦП (рис. 1) установлен на огневом стенде [3]. Работы проводились в соответствии с Госконтрактом, в обеспечении работ участвовали НГТУ, ООО НПО «Росток», ЗАО «КОМПОМАШ-ТЭК», ЗАО «ЗиО-КОТЭС».

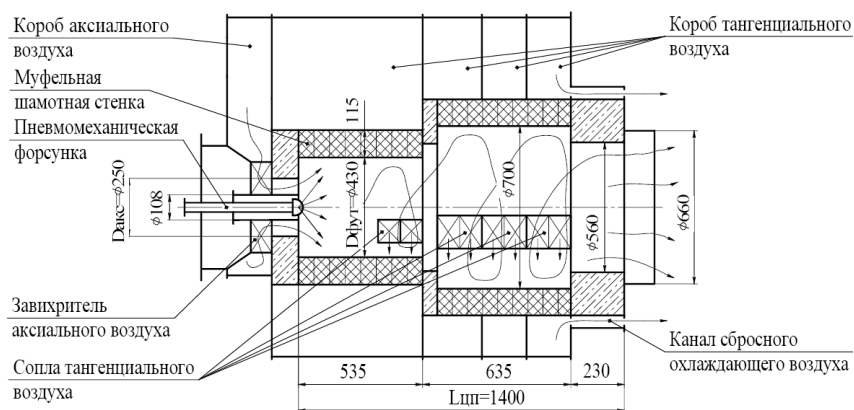


Рис. 1. Устройство циклонного предтопка

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование конструктивно-компоновочных параметров ЦП основано на численном математическом моделировании физико-химических процессов. Достоверность результатов численного исследования обусловлена их сопоставлением с результатами экспериментов на полномасштабной физической модели.

Численное исследование гидрогазодинамики, процессов горения в ЦП проводилось на базе программного комплекса ANSYS Fluent. [4]

2.1. Математические модели

Методика расчета процессов горения по программе ANSYS Fluent заключается в решении комплекса уравнений, основными из которых являются: уравнение неразрывности, закон сохранения энергии, закон сохранения импульса и прочие [4]. Для данного исследования из базы ANSYS Fluent в соответствии спецификой решаемых задач приняты следующие расчетные модели:

модель турбулентности k - ε (стандартного вида):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - G_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon;$$

модель переноса энергии излучением P -1:

$$\nabla \cdot (\Gamma \nabla G) - aG + 4an^2 \sigma T^4 = S_G;$$

модель выхода летучих «The constant rate devolatilization model»:

$$-\frac{1}{f_{v,0}(1-f_{v,0})m_{p,0}} \frac{dm}{dt} = A_0;$$

модель горения коксового остатка – диффузионно-кинетическая:

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p \frac{\rho R T_\infty Y_{ox}}{M_{w,ox}} \frac{D_0 R}{D_0 + R}.$$

2.2. Модель кавитационного жидкоугольного топлива

В численных исследования КЖТ по типу топлив ANSYS Fluent принципиально отнесено к угольным топливам. Однако модель КЖТ, разработанная для ANSYS Fluent, имеет особенности, которые представлены в [9]. В состав КЖТ входит собственно кузнецкий каменный уголь марки Д и вода. Теплофизические характеристики КЖТ рассчитываются по массовому соотношению угля и воды. Кинетическими параметрами горения компонентов КЖТ являются: температура выхода летучих, °С; скорость выхода летучих, с⁻¹; энергия активации летучих, Дж/кмоль; энергия активации кокса, Дж/кмоль. При моделировании конкретной угольной частицы весь процесс разбивается на стадии: прогрев частицы до начала испарения влаги из топлива; испарение влаги из топлива; выделение летучих; горение коксового остатка (по схеме $C \rightarrow CO \rightarrow CO_2$); прогрев/охлаждение золы остатка. [4]

2.3. Методика анализа результатов

Результатами численных исследований являются поля установившихся в ЦП температур, концентраций различных газов и дискретной фазы, скорости горения топлива и пр. Сопоставление численных и экспериментальных исследований производится по температуре на стенках ЦП, температуре факела и степени выгорания топлива в выходном сечении. Результаты экспериментов и компьютерных расчетов на математической модели анализировались в сравнении между собой и литературными данными [2, 5...10] и продемонстрировали хорошую сходимость.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

3.1. Исследование экспериментальных режимов работы ЦП

Численные исследования проведены для экспериментального образца ЦП. Исследуемая конструкция ЦП разбита на $467,5 \cdot 10^3$ ячеек. Кинетические параметры горения компонентов КЖТ представлены в табл. 1. Для расчетов горения используется неизотермическая модель. Температура подаваемого на горение воздуха составляет $T_v = 70$ °С, топлива $T_{\text{КЖТ}} = 30$ °С.

На рис. 2 представлено поле температур в осевом сечении ЦП. Ядро факела имеет температуру 900–1200 °С, обеспечивая воспламенение КЖТ. Температура газов вблизи стен лишь на незначительных участках достигает 1000 °С. Температура футерованных стенок (рис. 3) не превышает 700–900 °С. Концентрация кислорода (рис. 4) говорит о наличии воздушного пристенного потока. Области с максимальными скоростями горения кокса (рис. 5) располагаются на границах зон с максимальной температурой и высокой концентрацией кислорода. Результаты численных исследований подтверждаются экспериментами.

Опыты показали, что при температуре муфельной стенки в камере воспламенения $t_{cm} = 650\text{--}700$ °С воспламенение КЖТ происходит быстро, отмечается формирование кольцевой структуры факела в поперечном сечении ЦП.

Таблица 1

Кинетические параметры горения КЖТ и исходного кузнецкого угля марки Д

Наименование	Исх. уголь	КЖТ	Примечание
Температура выхода летучих, °С	350 ¹⁾	250	¹⁾ по данным [4]
Скорость выхода летучих, с ⁻¹	40 ²⁾	40	²⁾ по данным [4, 10]
Энергия активации летучих, Дж/кмоль	$2,0 \times 10^8$ ³⁾	$1,3 \times 10^8$	³⁾ по данным [4]
Энергия активации кокса, Дж/кмоль	$1,25 \times 10^8$ ⁴⁾	$1,1 \times 10^8$	⁴⁾ по данным [10]

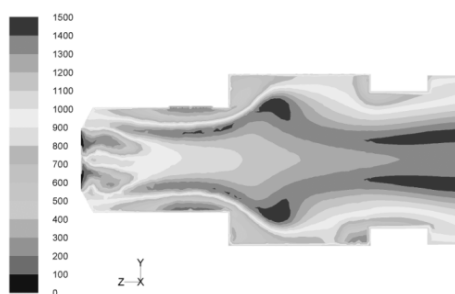


Рис. 2. Поле температур в продольном сечении по оси ЦП, °С

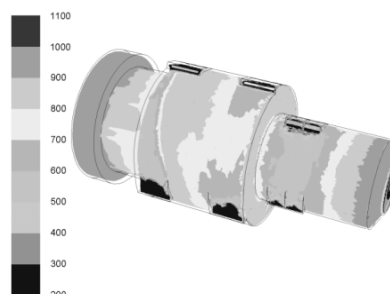


Рис. 3. Температура стенки (футеровки) ЦП, °С

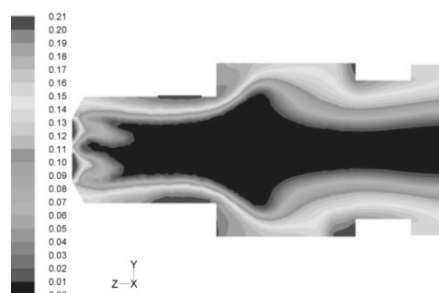


Рис. 4. Объемная доля кислорода в продольном сечении по оси ЦП

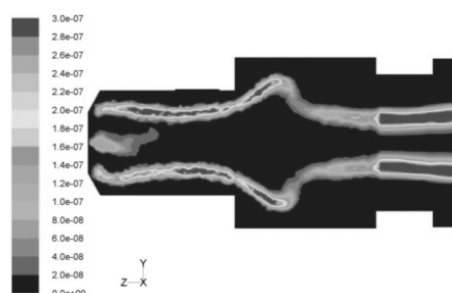


Рис. 5. Скорость горения кокса в продольном сечении по оси ЦП, кг/с

Сравнение результатов расчетных и замеренных температур футеровки показывает хорошую сходимость абсолютных значений и распределения температур по длине ЦП. Средняя температура газов на выходе из ЦП составляет 1062 °С, что несколько ниже температуры, замеренной пирометром в экспериментах (1090–1160 °С). Различие температур объясняется погрешностями измерений, различными характеристиками по механическому недожогу топлива: в численных исследованиях $q_4 = 10,3$ %, в экспериментах $q_4 = 7,4$ %.

3.2. Исследование аэродинамики ЦП с различными конструктивно-компоновочными параметрами

Активность рециркуляции горячих газов к корню факела в значительной степени определяет надежность воспламенения и стабильность горения топлива. Оценка влияния некоторых параметров (табл. 2) на образование зоны рециркуляции выполнена по результатам изотермических аэродинамических расчетов.

Таблица 2

Исходные данные для аэродинамических расчетов

Параметр	№ расчета						
	1	2	3	4	5	6	7
Масштаб модели, M	1	1	1	2	1	1	1
Параметр крутки в канале «1», n	2,4	4,8	7,2	2,4	2,4	2,4	2,4
Общий избыток воздуха, $\alpha''_{ЦП}$	1,38						
Доля воздуха в канале «1»	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,68	1,02
Доля воздуха в канале «2+3»	0,57	0,57	0,57	0,57	0,26	0,38	0,20
Доля воздуха в канале «4»	0	0	0	0	0,26	0	0
Доля воздуха в канале «5»	0	0	0	0	0,26	0	0
Доля воздуха в канале «6»	0,47	0,47	0,47	0,47	0,26	0,30	0,16

Расчеты проводились для оценки влияния: коэффициента крутки центрального аксиального воздуха; масштабирования; распределения тангенциального воздуха по длине ЦП; доли аксиального воздуха. Результатами расчетов являются поля скоростей в продольном сечении ЦП (рис. 6, а, б, в, г, д, е, ж). Все отрицательные значения X-компоненты скорости (вдоль оси ЦП) закрашены черным цветом – это зоны рециркуляции.

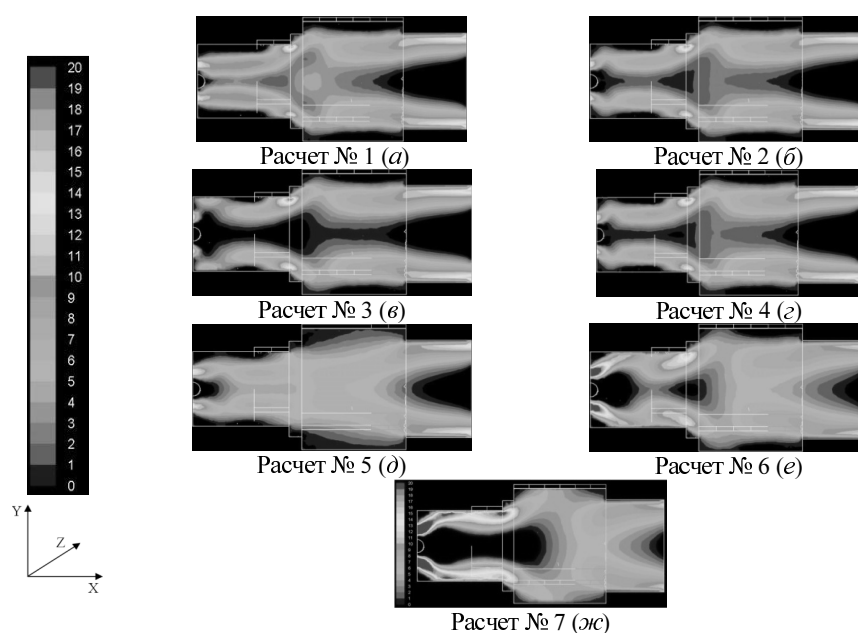


Рис. 6. Значение X-компоненты скорости (вдоль оси ЦП), м/с

Как видно из рис. 6, а, при близком к проектному параметру крутки в ЦП зона активной внутренней рециркуляции отсутствует. Из рис. 6, б, в видно, что повышение крутки аксиального воздуха до $n = 7,2$ ощутимо влияет на образование зоны внутренней рециркуляции. Вариант № 4 (рис. 6, г) показывает, что при масштабировании, т. е. пропорциональном увеличении расходных и геометрических характеристик ЦП, аэродинамика практически не изменяется.

Перераспределение подачи тангенциального воздуха (рис. 6, *д*) не дает значимого воздействия на организацию зоны рециркуляции. Тангенциальный воздух целесообразно подавать в периферийные сопла. Наиболее эффективным способом увеличения зоны рециркуляции является повышение расхода аксиального воздуха, что связано с увеличением массы и энергии закручивающего потока. Как видно из рис. 6, *е, ж*, даже при неизменной крутке $n = 2,4$ зона рециркуляции увеличивается значительно.

Проведенные расчеты и их анализ говорят о необходимости повышения параметра крутки и расхода воздуха через аксиальный канал, увеличения втулочного соотношения камеры воспламенения и кольцевого канала.

3.3. Исследование модифицированного варианта ЦП

По результатам экспериментальных и модельных исследований была рассмотрена конструкция ЦП, которая соответствовала всем рациональным конструктивно-компоновочным решениям предтопка для данного КЖТ и при данных условиях эксплуатации [9]. Модельные исследования модифицированного предтопка осуществлялись при его работе совместно с топкой парового котла. Результаты моделирования показали, что в ЦП и топке котла обеспечивается стабильное горение КЖТ. Аэродинамика ЦП характеризуется интенсивной зоной рециркуляции топочных газов (900–1100 °С) к корню факела. Максимальные топочные температуры не превышают 1400 °С. Поля температур говорят о локализации факела в центре: внутри ЦП вторичный воздух защищает стены от наброса факела, в топочной камере эту функцию выполняет третичный воздух. В поперечных сечениях ЦП распределения температур имеют кольцевую структуру, в пристенной зоне располагается область с температурами 600–700 °С.

Результаты расчетов свидетельствуют о хорошей степени выгорания топлива в пределах ЦП (~60 %). Тепловые расчеты в программе Boiler Designer подтвердили значения принятых в моделировании теплофизических коэффициентов теплообмена и перепадов температур в топке. По результатам исследований разработаны рекомендации по выбору конструктивно-компоновочных параметров ЦП с тепловыми мощностями до 21 МВт. Нужно отметить, что при использовании КЖТ для углей с сильно отличающимися характеристиками от углей марок Г, Д конструкция ЦП может иметь коррекцию по конструктивно-компоновочным параметрам [11].

Таким образом, впервые разработана методика расчета горения КЖТ, получена на основе математического моделирования и эксперимента на исследовательском стенде рациональная конструкция ЦП для сжигания КЖТ в котлах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная для ANSYS Fluent модель формирования исходных данных КЖТ из каменного угля марки Д, Г подтверждается результатами экспериментов и может быть использована для расчетов процессов горения КЖТ. Устойчивая зона внутренней рециркуляции топочных газов в ЦП обеспечивается при втулочном соотношении $d_{\text{акс}} \leq (0,32 \pm 0,02) \cdot D_{\text{фут}}$. При разработке ЦП рекомендуется выдерживать теплонапряжение объема $q_{V, \text{доп}} = 3,7 \pm 0,2$ МВт/м³, теплонапряжение сечения $q_{F, \text{доп}} = 9,0 \pm 0,6$ МВт/м². Диаметр ЦП мощностью до 12 МВт рекомендуется определять по формуле: $D_{\text{ЦП}} = (0,912 \pm 0,045) \cdot \sqrt[3]{V_{\text{ЦП}}}$, свыше 12 МВт: $D_{\text{ЦП}} = (0,376 \pm 0,012) \cdot \sqrt{Q_{\text{ЦП}}}$. Длина ЦП рассчитывается как $L = (1,7 \pm 0,25) \cdot D_{\text{фут}}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Овчинников Ю.В. Исследование крупности искусственного композиционного жидкого топлива (ИКЖТ) / Ю.В. Овчинников // Энергетика и теплотехника: Сб. науч. тр. / под ред. акад. РАН В.Е. Накорякова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2008. – Вып. 12. – С. 153–161.
- [2] Wibberley L. Efficient use of coal water fuels. Technology assessment report 74 / L. Wibberley // Cooperative Research Center for Coal in Sustainable Development. – 2008. – 85 p.
- [3] Шихотинов А.В. Стенд для экспериментального исследования сжигания ИКЖТ в топочно-горелочных устройствах и исследование сжигания топлива / А.В. Шихотинов и др. // XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» / Сб. тр. в 3-х томах. Т.3. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – С. 285–286.
- [4] ANSYS Fluent 12.0. User's Guide, 2009.
- [5] Овчинников Ю.В. Исследование воспламеняемости твердых топлив и ИКЖТ / Ю.В. Овчинников и др. // Доклады АН ВШ РФ. 2011. – № 1(16).

- [6] Делягин Г.Н. Сжигание водоугольных суспензий на опытно-промышленной установке / Г.Н. Делягин и др. // Уголь. – 1964. – № 9. – С. 86–87.
- [7] Бутылькова Т.И. Сжигание обводненных каменных углей с малым содержанием летучих в виде водоугольных суспензий в опытной топке парового котла / Т.И. Бутылькова и др. // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. – М.: Наука, 1967. – С. 135–145.
- [8] Делягин Г.Н. Сжигание водоугольных суспензий из донецких тощих углей в топке промышленного парового котла / Г.Н. Делягин и др. // Новые методы сжигания топлива и вопросы теории горения. – М.: Наука, 1967 – С. 40–51.
- [9] Цепенюк А.И. Численные исследования сжигания композиционного водоугольного топлива в котле типа ДКВр-20-13 / А.И. Цепенюк и др. VIII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива» // Сборник трудов: Новосибирск, Ноябрь 12-16. – 2012. – С. 102.1–102.9.
- [10] Померанцев В.В. Основы практической теории горения / В.В. Померанцев. – Л.: Энергия. – 1973.
- [11] Tsepenok A.I. Calculating analysis of firing different composition artificial coal liquid fuels (ACLF) in the cyclone primary furnace / A.I. Tsepenok // Proceedings 7th International Symposium on Coal Combustion: Harbin, China, July 17–20. – 2011. – P. 507–511.

REFERENCES

- [1] Ovchinnikov Ju.V. Issledovanie krupnosti iskusstvennogo kompozitsionnogo zhidkogo topliva (IKZhT) // Jenergetika i teplotehnika: Sb. nauch. tr./ pod red. akad. RAN V.E. Nakorjakova.- Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2008. – Vyp. 12. – S. 153–161.
- [2] Wibberley L. Efficient use of coal water fuels. Technology assessment report 74 / Cooperative Research Center for Coal in Sustainable Development. – 2008. – 85 P.
- [3] Shihotinov A.V. i dr. Stend dlja jeksperimental'nogo issledovaniya szhiganiya IKZhT v topochno-gorelochnyh ustroystvah i issledovanie szhiganiya topliva // XVII Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija studentov, aspirantov i molodyh uchenyh «Sovremennaja tehnika i tehnologii»/ Sb. tr. v 3-h tomah. T.3. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2011. – S. 285–286.
- [4] ANSYS Fluent 12.0. User's Guide, 2009.
- [5] Ovchinnikov Ju.V. i dr. Issledovanie vosplamenjaemosti tverdyh topliv i IKZhT / Doklady AN VSh RF. 2011. – № 1(16).
- [6] Deljagin G.N. i dr. Szhiganie vodougol'nyh suspenzij na opytно-promyshlennoj ustanovke / Ugol'. – 1964. – № 9. – S. 86–87.
- [7] Butyl'kova T.I. i dr. Szhiganie obvodnennyh kamennyh uglej s malym soderzhanijem letuchih v vide vodougol'nyh suspenzij v opytноj topke parovogo kotla / Szhiganie vysokoobvodnennogo topliva v vide vodougol'nyh suspenzij. – М.: Nauka, 1967. – S. 135–145.
- [8] Deljagin G.N. i dr. Szhiganie vodougol'nyh suspenzij iz donekih toshhih uglej v topke promyshlennogo parovogo kotla / Novye metody szhiganiya topliva i voprosy teorii gorenija. Moskva: Nauka, 1967. – S. 40–51.
- [9] Cepenok A.I. i dr. Chislennye issledovaniya szhiganiya kompozitnogo vodougol'nogo topliva v kotle tipa DKVr-20-13 / VIII Vserossijskaja konferencija s mezhdunarodnym uchastiem «Gorenie tverdogo topliva» / Sbornik trudov: Novosibirsk, Nojabr' 12-16. – 2012. S. 102.1–102.9.
- [10] Pomerancev V.V. Osnovy prakticheskoi teorii gorenija. L.: Jenergija. – 1973.
- [11] Tsepenok A.I. Calculating analysis of firing different composition artificial coal liquid fuels (ACLF) in the cyclone primary furnace / Proceedings 7th International Symposium on Coal Combustion: Harbin, China, July 17–20. – 2011. – P. 507–511.

Овчинников Юрий Витальевич, доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – теплотехника и энергетика твердых топлив. E-mail: tes.nstu@gmail.com

Серант Феликс Анатольевич, доктор технических наук, заместитель директора по новым технологиям закрытого акционерного общества «ЗиО-КОТЭС». Основное направление научных исследований – теплотехника и энергетика твердых топлив. E-mail: felix.serant@cotes-group.com

Цепенюк Алексей Иванович, аспирант кафедры тепловых электрических станций Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – теплотехника и энергетика твердых топлив. E-mail: alexey.tsepenok@cotes-group.com

Yu.V. Ovchinnikov, F.A. Serant, A.I. Tsepenok

The study of cyclone primary furnace for cavitation coal liquid fuel combustion structural and arrangement parameters

Technologies of solid fuels (coal, anthracite) in thermal engineering are less advanced than the technologies of expensive liquid fuel and motor fuels (hydrocarbons). Today, the world's coal processing projects are being developed in the fuel consumption of a similar technological properties of hydrocarbon. An alternative way for producing liquid fuels from coal is the technology of the Novosibirsk State Technical University – cavitation coal liquid fuel (CCLF). The heart of obtaining CCLF is a sequence of processes of crushing the solid fuel in high-speed mills (disintegrator) followed by grinding to the submicron particle in the hydro-mechanical cavitation field (in cavitator). The result is a activated ultrathin liquid system with high concentration of particles which is latest modification of coal water fuel. One of the way of application CCLF in thermal engineering is combustion CCLF in boilers equipped with primary cyclone furnace (PCF).

Investigation of CCLF combustion in the PCF carried out via mathematical modeling (CFD) and accompanied by and full-scale tests on experimental plant. As a result, research has developed a method of calculating the structural and arrangement parameters for technologically efficient type of PCF for CCLF combustion.

Key words: cavitation coal liquid fuel, cyclone primary furnace, structural and arrangement parameters, ANSYS Fluent.