

http://www.intuit.ru/department/expert/neurocomputing/8/neurocomputing_8.html, свободный.

4. Рейзенбук, К.Э. Программный комплекс для технического анализа рынка ценных бумаг на основе моделей теории детерминированного хаоса / К.Э. Рейзенбук, И.А. Пимонов, Ю.В. Хараман // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2008. – №4. – С. 100-104.

5. Пимонов, И.А. Комплекс программ для оценки и анализа фрактальных свойств фондового рынка / И.А. Пимонов, А.И. Трегуб // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2008. – №4. – С. 105-110.

6. Хайкин, С. Нейронные сети полный курс. 2-е изд., испр. – М.: ВИЛЬЯМС, 2006. – 1104 с.

7. Погорелов, Н.Е. Алгоритмы обучения нейросетевой системы анализа и прогнозирования биржевых котировок акций // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии (ИТСиТ-2012): Материалы Всероссийской молодежной конференции, г. Кемерово, 20-22 сентября 2012 г. / Под редакцией проф. А.Г. Пимонова; Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева. – Кемерово, 2012. – С. 236-237.

8. Погорелов, Н.Е. Нейросетевая система анализа и прогнозирования биржевых котировок акций // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии (ИТСиТ-2012): Материалы Всероссийской молодежной конференции, г. Кемерово, 20-22 сентября 2012 г. / Под редакцией проф. А.Г. Пимонова; Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева. – Кемерово, 2012. – С. 46-47.

9. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 452 с.

10. Финам.ру – Рынок и Аналитика. Экспорт котировок АвтоВАЗ ао [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.finam.ru/analysis/profile0002700007/default.asp>, свободный.

Авторы статьи:

Погорелов
Никита Евгеньевич,
выпускник каф. прикладных ин-
формационных технологий Куз-
ГТУ.
E-mail: agittoa42@mail.ru

Рейзенбук
Кристина Эдуардовна,
ст. преп. каф. прикладных ин-
формационных технологий Куз-
ГТУ.
E-mail: sunstroke99@mail.ru

Пимонов
Александр Григорьевич,
докт. техн. наук, профессор каф.
прикладных информационных
технологий КузГТУ.
E-mail: pag_vt@kuzstu.ru

УДК 662.6/8

Ю.А. Сенчурова, Е.В. Заречнева

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПЫЛЕНИЯ И СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ВИХРЕВОЙ ТОПКЕ

Устойчивость и полнота выгорания топлива в камере сжигания определяются степенью распыла вводимого в камеру топлива и совершенством аэродинамики газовых потоков внутри камеры. Эти качества обеспечивают надежные условия воспламенения и стабилизации факела, надежное смешение топлива с окислителем и распределение температур, а также оптимальные условия выгорания топлива по всему объему камеры. Качество распыления водоугольной суспензии (ВУТ) в камере сжигания зависит от совершенства конструкции распыляющего устройства и свойств топлива.

В работе Г.Н. Делягина [1] отмечается, что сжигание водоугольного топлива существенно отличается от аналогичного процесса при использовании пылевидного угля. При этом утверждается, что влияние марки угля и его зольности на температуру воспламенения и устойчивость горения незначительно. Вместе с тем, результаты практического применения показывают, что при сжигании ВУТ, приготовленных из высокометаморфизованных углей и антрацитов, требуется

более высокий первоначальный нагрев топочного пространства для инициирования процесса воспламенения топлива. Аналогичное явление зафиксировано и при использовании ВУТ, приготовленного из высокозольных угольных шламов. Все это указывает на то, что модели воспламенения и горения водоугольного топлива, предлагаемые Г.Н. Делягиным и другими авторами, требуют корректировки.

Предполагается, что при распылении водоугольного топлива образуется поток полидисперсных капель (частиц), содержащий чисто угольные частицы, «освобожденные» за счет высокой скорости от жидкой фазы, и капли водоугольного топлива, состоящих из наиболее тонких угольных частиц и жидкой фазы. При этом в зависимости от гранулометрического состава угля в ВУТ, количество чисто угольных частиц может достигать 25-30 %.

На наш взгляд, распыление водоугольного топлива воздухом или водяным паром осуществляется в два этапа. В форсунке при смешении ВУТ и распыляющего агента происходит дробление

струи ВУТ за счет кинетической энергии последнего. Далее, на втором этапе, при разгоне топлива осуществляется их дробление за счет сил сопротивления, оказываемого окружающей газовой средой, скорость движения которой многократно меньше скорости движения капель. В результате возникающего динамического воздействия капли расплющиваются и разрываются на более мелкие.

Рассмотрим механизм дробления капель ВУТ по аналогии с мазутным топливом [2].

Давление газовой среды P_1 на движущуюся в ней каплю определяется воздействием силы трения $F_{тр}$ на лобовую площадь капли S_x :

$$P_1 = \frac{F_{тр}}{S_x} \quad (1)$$

Пренебрегая силой тяжести и рассматривая

лишь действие газовой среды, получаем, что сила трения равна:

$$F_{тр} = \psi S_x \rho V_r^2, \quad (2)$$

где ψ , ρ – коэффициент сопротивления и плотность газовой среды, V_r – относительная скорость капли по отношению к газовой среде.

Подставляя выражение (2) в уравнение (1), получим:

$$P_1 = \psi \rho V_r^2.$$

С другой стороны, давление, испытываемое каплей за счет сил поверхностного натяжения, составляет:

$$P_2 = \frac{2\sigma}{r_x}, \quad (3)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения,

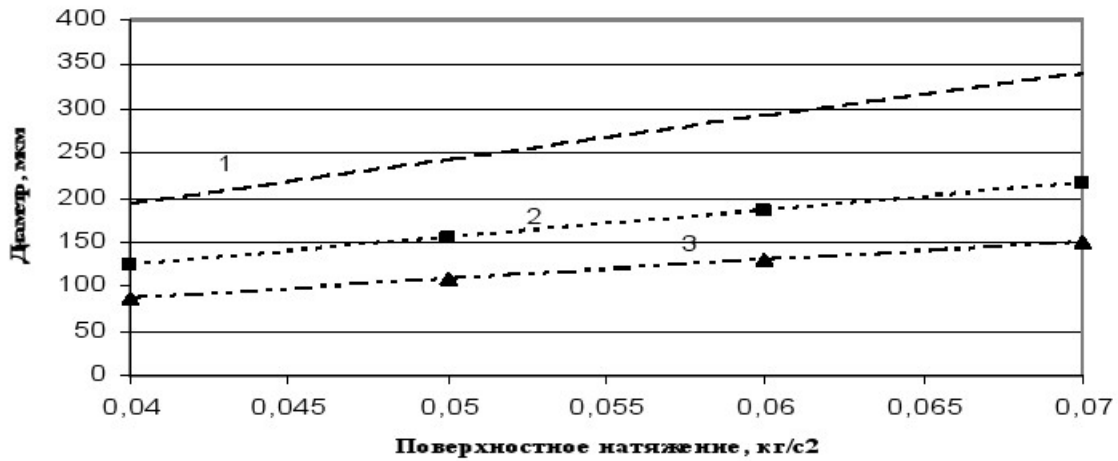


Рис. 1. Зависимость диаметра распыленных капель от поверхностного натяжения (Скорость капли, V_r : 1 – 40; 2 – 50; 3 – 60 м/с)

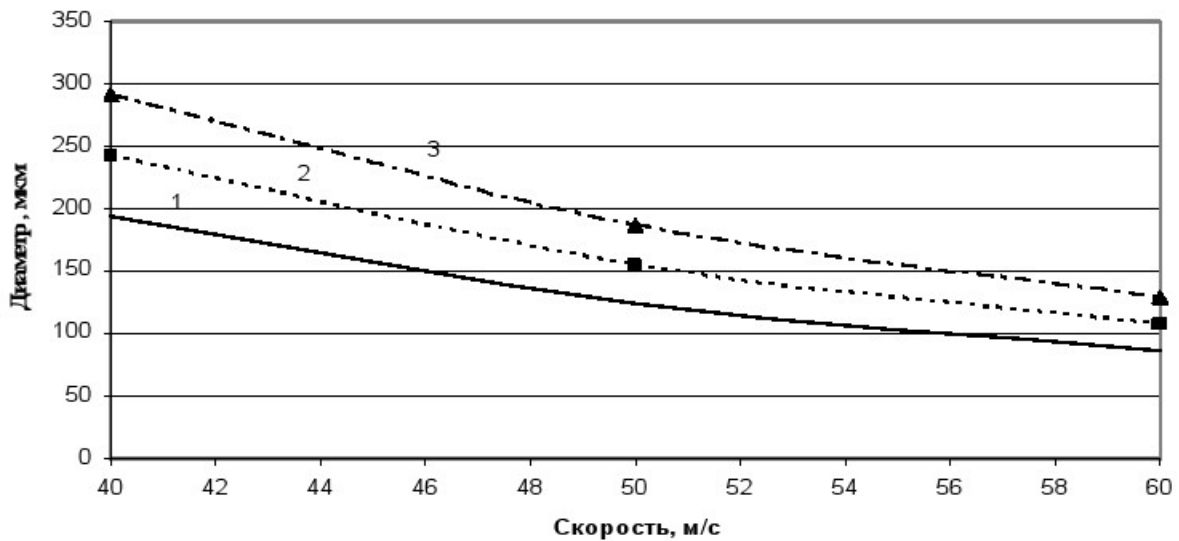


Рис. 2 – Зависимость диаметра распыленных капель от скорости их движения (Поверхностное натяжение, σ : 1 – 0,040; 2 – 0,050; 3 – 0,060 кг/с²)

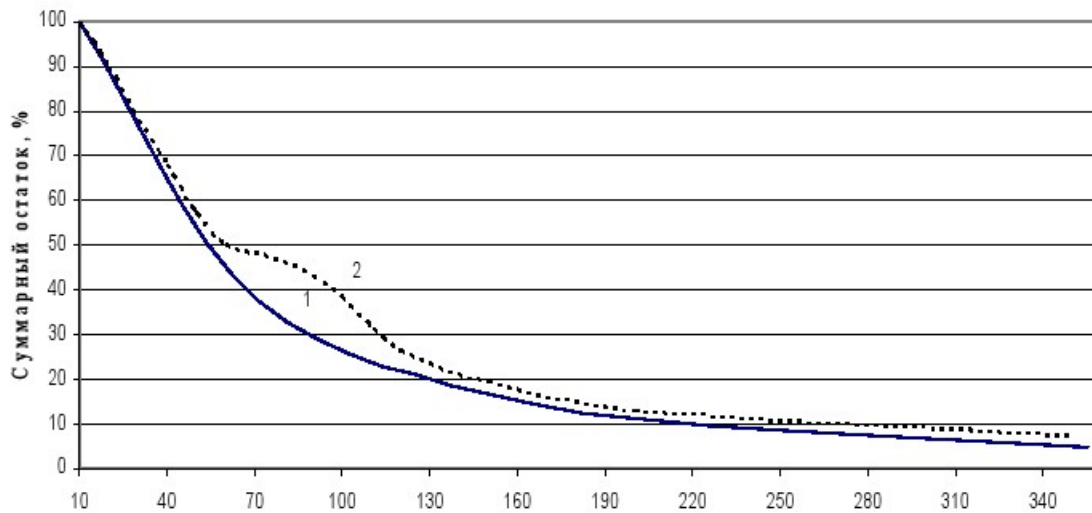


Рис. 3. Характерное интегральное распределение «капель-частиц» и капель ВУТ при распыле: 1 – распределение «капель-частиц», 2 – распределение капель ВУТ

r_x – радиус капли.

Предполагается, что распад капли на более мелкие происходит, если

$$P_1 > P_2. \quad (4)$$

В этом случае, максимальный размер капли получается при условии $P_1 = P_2$, т.е.

$$\psi \rho V_r^2 = \frac{2\sigma}{r_x}. \quad (5)$$

Из выражения (5) находим:

$$r_x = \frac{2\sigma}{\psi \rho V_r^2}. \quad (6)$$

Из (6) видно, что диаметр капель ВУТ существенно зависит от поверхностного натяжения, плотности среды и относительной скорости движения капли. Причем, при повышении температуры, когда вязкость уменьшается, и повышении скорости обтекания тонкость распыления жидкого топлива увеличивается.

Таким образом, утверждается, что при распылении ВУТ образуются как чисто угольные частицы («капли-частицы» крупнее 80-100 мкм), с которых за счет сил гидродинамического трения срывается жидкая пленка с наиболее тонкими частицами, так и водоугольные капли, состоящие из тонких частиц угля и жидкой фазы.

На рис. 1 представлена расчетная зависимость диаметра распыленных капель от поверхностного натяжения при различных значениях скорости капли. Расчеты проводились для значений $V_r = 40 - 60$ м/с, $\psi = 0,2$, $\rho = 1,29$ кг/м³.

Из рис. 1 видно, что тонкость распыления жидкого топлива увеличивается при уменьшении поверхностного натяжения.

На рис. 2 показана расчетная зависимость

диаметра распыленных капель ВУТ от скорости их движения при различных значениях $\sigma = 0,040 - 0,060$ кг/с², $\psi = 0,2$, $\rho = 1,29$ кг/м³.

Как видно из рис. 2, чем выше относительная скорость движения, тем меньше максимальный диаметр образующихся капель.

Таким образом, при скорости вылета распыленных капель из сопла форсунки, равной 40-60 м/с, максимальный диаметр капель составляет от 100 до 300 мкм.

Для подтверждения полученных результатов были проведены экспериментальные исследования. Экспериментально распыление водоугольного топлива пневмомеханическими форсунками изучалось на специально созданном стенде [3]. Испытательный стенд предназначен для «холодного» опробования форсунок, оценки качества распыла ВУТ и для определения параметров форсунок (расход и давление ВУТ, расход и давление сжатого воздуха, дисперсность и конфигурация факела распыла). Мгновенные результаты замеров после визуальной оценки фотографировались для дальнейших лабораторных исследований и изучения.

Хорошим считался распыл, при котором капли на пластине оставляли след размером менее 1 мм. Удовлетворительным считался распыл, при котором на пластине отсутствовали следы капель крупнее 2 мм. Испытания форсунки прекращались при невозможности получить удовлетворительный распыл.

Распыляемое водоугольное топливо имело следующие характеристики. Массовая доля твердой фазы – 57-60 %, вязкость при скорости сдвига 10 с⁻¹ – 600-800 мПа·с, крупность частиц – 0-300 мкм.

Для анализа результатов распыления ВУТ от-

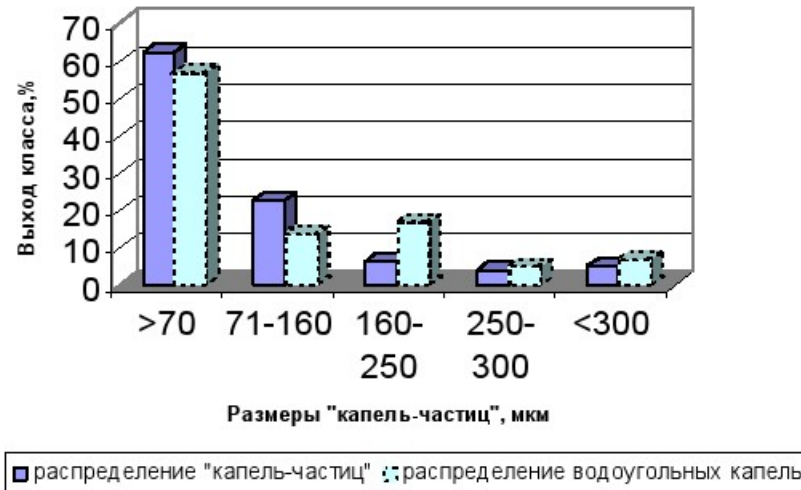


Рис. 4. Характерное дифференциальное распределение «капель-частиц» и капель ВУТ при распыле

печатки распыла форсунки были обработаны при помощи ЭВМ. Полученные значения размеров капель преобразовывались по формуле:

$$\omega = n \delta d^3,$$

где ω – массовый выход, n – число капель, d – средний диаметр капли, δ – плотность капли.

В табл. 1 показано полученное распределение «капель-частиц» по размеру. На рис. 3 – 4 показаны полученные кривые распределения.

Таблица 1. Характерное распределение «капель-частиц» по размеру при распылении

Размер «капель-частиц», мкм	Количество частиц угля в ВУТ, %	Количество «капель-частиц» при распыле, %
>300	5	7
250-355	3,8	5
160-250	6,3	17
71-160	22,7	14
<71	62,2	57

Как видно из рис. 3, интегральное распределение распыленных «капель-частиц» ВУТ по размерам характеризуется наличием «горба» в диапазоне от 70 до 120 мкм.

Увеличенное количество крупных водоугольных капель в указанном диапазоне и выполненный анализ механизма дробления капель ВУТ при распылении указывают на то, что распыленные капли состоят из двух качественно различных систем: первая система с крупными «каплями», диаметр которых больше 80-100 мкм, представлена в основном освободившимися от жидкой фазы угольными частицами, а вторая – с мелкими частицами, диаметр которых меньше 80-100 мкм, – водоугольными каплями.

Таким образом, механизмы воспламенения и сжигания полидисперсного потока капель ВУТ

необходимо рассматривать с учетом законов теплообмена и химических реакций, происходящих в жидкоугольных каплях и обычных угольных частицах.

Для моделирования движения частиц угля и капель ВУТ использовалась модель дискретной фазы, основанная на лагранжевой формулировке взаимодействия дискретной и непрерывной фазы [4].

Выполненные по программе «FLUENT» расчеты позволяют получить распределение скорости и температуры в различных сечениях топки, а также траектории движения частиц топлива в вихревой топке.

На рис. 5 – 8 представлены контуры скоростей, структура течения и векторы скоростей в вертикальных сечениях топки.

Направления векторов тангенциальной скорости в сечении топки и на выходе из топочной камеры представлены на рис. 9 – 10.

Как видно из рис. 5–10, в вихревой камере специальной конструкции за счет системы нижнего дутья и взаимодействием с горелочным потоком формируется вихрь, наличие которого является одним из основных принципов вихревой технологии.

В результате расчетов получено максимальное время нахождения «капель-частиц» и капель ВУТ в вихревой топке.

Анализ траекторий частиц показывает, что полученные траектории имеют форму спиралей. Из рис. 11 видно, что чем крупнее «капли-частицы», тем больше время их пребывания в камере и, соответственно, время их сгорания. То есть частицы топлива попадают в вихрь огня и практически полностью сгорают, в результате увеличивается время пребывания топлива в зоне активного горения. Таким образом, применение низкотемпературной вихревой технологии сжигания ВУТ обеспечивает пребывание капель

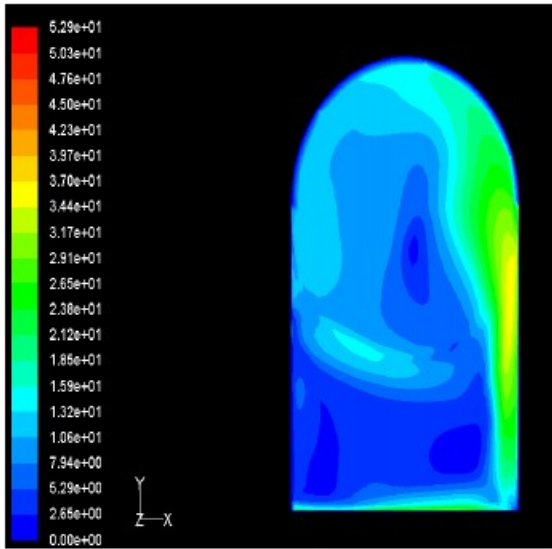


Рис. 5. Контуры скоростей в вертикальном сечении точки $z=0,375$ м

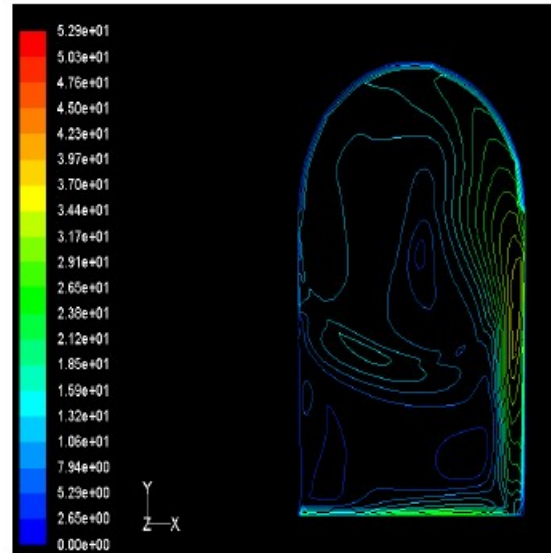


Рис. 6. Структура воздушных потоков в вертикальном сечении точки $z=0,375$ м

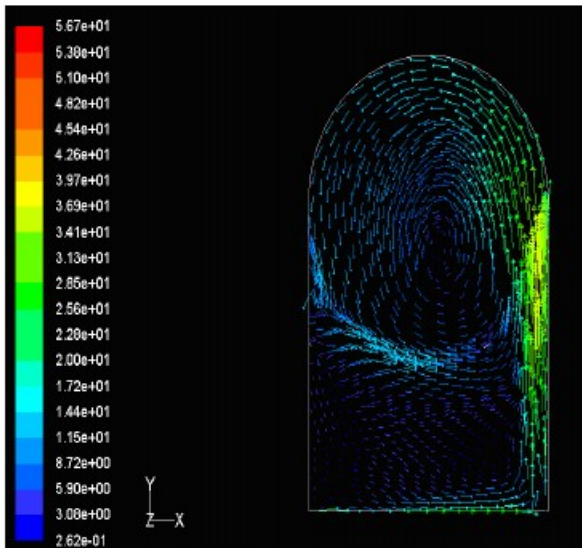


Рис. 7. Векторы скоростей в вертикальном сечении точки $z=0,375$ м

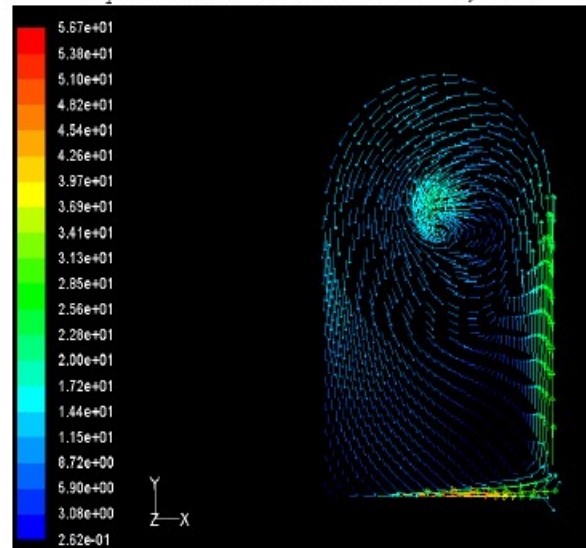


Рис. 8. Векторы скоростей в вертикальном сечении точки $z=0,750$ м

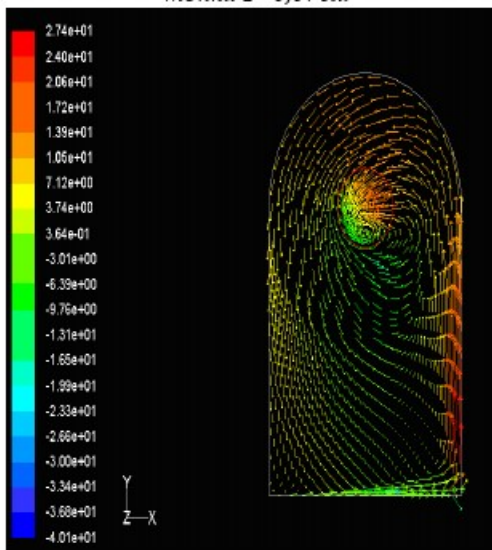


Рис. 9. Векторы тангенциальной скорости в вертикальном сечении точки $z=0,75$ м

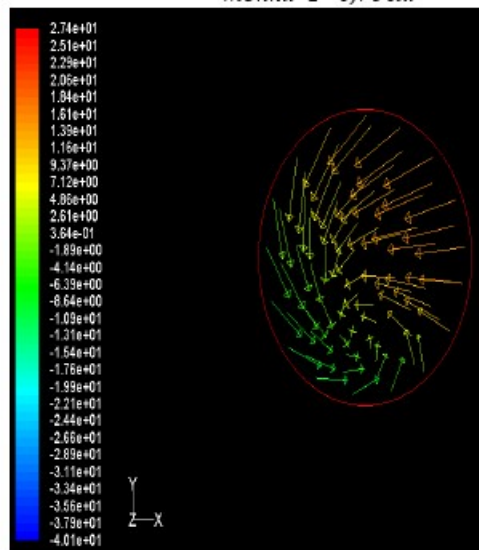


Рис. 10. Векторы тангенциальной скорости на выходе из топочной камеры

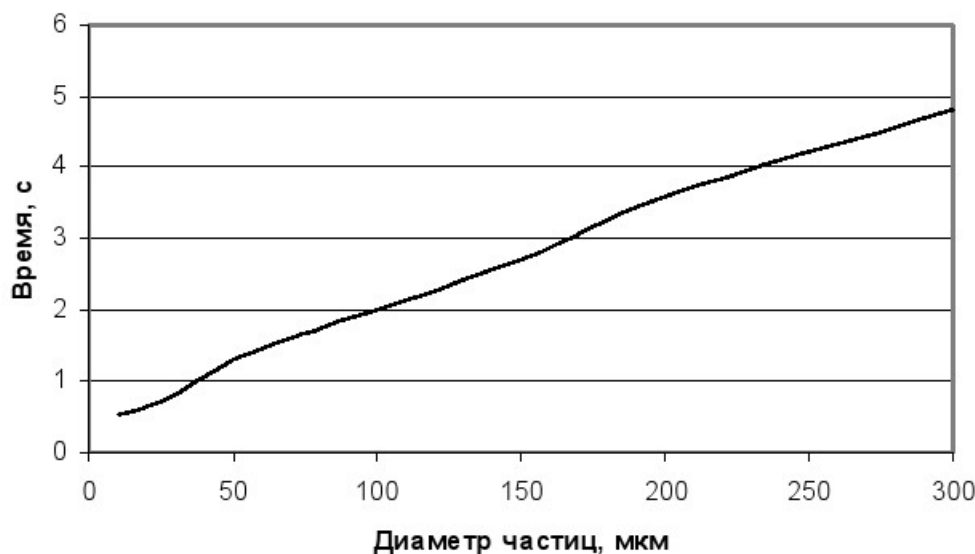


Рис. 11. Время нахождения «капель-частиц» и капель ВУТ в камере сгорания

топлива в топочном пространстве не менее 5-6 с за счет спиралеобразных траекторий горящих частиц.

Таким образом, путем численного моделирования установлено, что время пребывания распыленных наиболее крупных капель топлива в топочном пространстве

составляет не менее 5-6 с, что обеспечивает практически полное их выгорание.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сметанников, Б.Н. Исследование воспламенения и горения капли водоугольной суспензии / Б.Н. Сметанников, Г.Н. Делягин // Горение твердого топлива. – Наука. – 1969. – 556 с. Сметанников, Б.Н. Исследование воспламенения и горения капли водоугольной суспензии / Б.Н. Сметанников, Г.Н. Делягин // Горение твердого топлива. – Наука. – 1969. – 556 с.
2. Хзмаян, Д.М. Теория топочных процессов / Д.М. Хзмаян. – М.: Энергоатомиздат. – 1990. – 352 с.
3. Сенчурова, Ю.А. Результаты исследований распыления водоугольного топлива пневмомеханическими форсунками / Ю.А. Сенчурова, В.И. Мурко, В.И. Федяев, Д.А. Дзюба, Е.М. Пузырев // Известия Томского Политехнического Университета, 2008. – Т.312. – № 4. – с. 37-40.
4. Бубенчиков, А.М. Численные модели динамики и горения аэродисперсных смесей в каналах / А.М. Бубенчиков, А.В. Старченко. – Изд-во Томского Университета. – 1998.

□ Авторы статьи

Сенчурова
Юлия Анатольевна,
канд техн. наук, доцент, зав. каф.
математики и естественных наук
(филиал КузГТУ в г. Белово)
E-mail: ysenchurova@yandex.ru.

Заречнева
Евгения Викторовна,
преподаватель филиала
КузГТУ в г. Белово
E-mail: grenc_87@mail.ru