

УДК 532.529.5

Диспергирование трехкомпонентных суспензий после распыления пневматической форсункой*

Д.В. Гвоздяков¹, А.В. Зенков¹, Л.И. Мальцев²

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: dim2003@tpu.ru

Экспериментально изучены характеристики трехкомпонентных суспензионных топлив, включающих уголь, воду и пирогенетическую жидкость (побочный продукт термической переработки древесных отходов), а также исследованы процессы диспергирования полученных суспензий применительно к технологии их сжигания в энергетических котлах. Образцы суспензий для исследования получены по технологии, включающей измельчение угольной массы на шаровой барабанной мельнице, дозированное смешивание компонентов и обработку полученной смеси на роторном гидродинамическом генераторе кавитации, обеспечивающем доизмельчение угольной массы, гомогенизацию суспензии и механохимическую активацию топлива. Диспергирование суспензий производилось с использованием пневматической форсунки с внешним смешением суспензии и распыляющего агента. Средний размер капель суспензии в струе после распыления определялся при помощи интерферометрического метода (Interferometric Particle Imaging, IPI). Регистрация скорости капель осуществлялась методом цифровой трассерной визуализации (Particle Image Velocimetry, PIV). Получены характеристики газожидкостного течения, создаваемого форсункой, от первичного разрушения жидкой струи до конечного состояния спрея.

Ключевые слова: диспергирование, водоугольная суспензия, пневматическая форсунка, газокapельная струя.

Введение

Технологии распыления жидкостей высокоскоростными газовыми струями реализуются в различных отраслях, например, при дезактивации твердых поверхностей от радиоактивного загрязнения, при пожаротушении, в авиационных и ракетных двигателях, при распылении сильновязких жидких сырьевых веществ в химической промышленности, при сжигании суспензионных топлив в энергетических котлах [1–3].

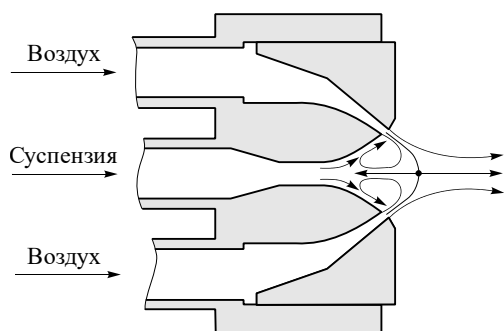
Основными причинами использования новых многокомпонентных топлив в энергетике являются рост цен на традиционные энергоносители [4], возрастание требований

* Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00142).

к охране окружающей среды [5], накопление огромных объемов отходов углеобогачительных и агропромышленных предприятий, загрязняющих природу, хотя утилизация отходов позволяет не только решать экологические проблемы, но и улучшать теплофизические характеристики топлив. В качестве таких перспективных топлив рассматриваются водоугольные суспензии (ВУС) с добавками отходов углеобогачительных комбинатов (фильтр-кек) [6], отработанных нефтехимических материалов (масла, шламы очистки танков нефтеналивных судов, емкостей и трубопроводов от нефти и нефтепродуктов) [7], отходов лесозаготовительных и перерабатывающих предприятий (опилки [8], продукты пиролиза древесных отходов [9]). Введение в состав водоугольных топлив (ВУТ) вышеуказанных компонентов решает ряд проблем — улучшение характеристик зажигания и горения, утилизация отходов и др. [10, 11]. Однако на стадиях приготовления и сжигания новых топлив возникают новые проблемы. Изменяются характеристики суспензий (плотность, вязкость, коэффициент поверхностного натяжения), что вызывает, в частности, необходимость совершенствования технологии приготовления, сжигания и распыления топлива. К настоящему времени для анализа процессов зажигания и горения ВУС (в условиях реальных температур) разработаны экспериментальные и численные методы [12, 13], но при изучении процессов диспергирования водоугольных суспензий в реальных условиях вопросы остаются.

Устройства для распыления жидких сред высокоскоростными газовыми струями — пневматические форсунки — наиболее употребительны. Известные в литературе конструкции суспензионных форсунок условно можно разделить на два типа: диспергаторы с внутренним смешением топлива и распыляющего агента (РА), например [14], и с внешним смешением [15, 16]. В первом случае ВУС интенсивно перемешивается с РА внутри форсунки и на выходе из форсунки формируется газожидкостная струя с близкими скоростями капель жидкости и газа. При этом нередко вблизи сопла струя содержит крупные фрагменты топлива. Ниже по потоку в результате взаимодействия с РА происходит разрушение этих фрагментов, как правило, за счет высокой неоднородности газовых потоков, действия центробежных сил при хаотичном вращении капель ВУС и т.д. Однако не всегда качество распыла оказывается удовлетворительным.

Во втором случае суспензия может выходить из сопла даже в виде жидкой струи и вступать во взаимодействие с РА за пределами форсунки во внешнем пространстве. На рис. 1 представлена принципиальная схема такой форсунки [15]. Отличительной особенностью этой форсунки является высокая скорость РА. Вытекая из щелевого конического сопла со скоростью выше скорости звука, РА образует за пределами форсунки сходящийся струйный газовый поток. В результате столкновения струй этого потока образу-



ется течение вдоль оси форсунки в первоначальном направлении, а также формируется возвратная кумулятивная струя газа навстречу топливной струе. В силу эффекта Коанда жидкая струя имеет тенденцию прилипать к стенкам диффузорного сопла и растекаться вдоль них тонкой пристенной струей. Однако процесс этот неустойчивый. Высокоскоростная

Рис. 1. Схема пневматической форсунки [15].

возвратная струя газа, внедряясь во встречную топливную струю, нарушает ее целостность и заставляет жидкость распределяться по стенкам диффузора. При этом возвратная газовая струя после соударения с топливной струей еще раз меняет свое направление на обратное, растекается вдоль стенок диффузора и ускоряет поток жидкости, а после столкновения этой уже газожидкостной струи с основным газовым потоком, вытекающим из щелевого сопла, принимает участие в формировании тороидального газожидкостного вихря внутри диффузора.

В результате взаимодействия газожидкостного топливного потока, порождаемого тороидальным вихрем, и высокоскоростного газового потока на выходе из диффузора формируется мелкодисперсный газокапельный факел.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование процессов диспергирования двух- и трехфазных суспензий после распыления пневматической форсунки [15] в условиях высоких скоростей распыляющего агента (воздуха).

Материалы и методы исследований

В качестве компонентов ВУС использовались бурый уголь, водопроводная вода и пирогенетическая жидкость. Их характеристики приведены в табл. 1.

Пирогенетическая жидкость (ПЖ) является побочным продуктом термической переработки древесины и в составе ВУС оказывает существенное влияние на коэффициент поверхностного натяжения суспензии.

Технология приготовления ВУТ, по которой создавались образцы для испытаний, включает три основные операции: измельчение угольной массы на шаровой барабанной мельнице, дозированное смешивание компонентов ВУТ (в данном случае уголь, вода, ПЖ) и обработку полученной смеси на роторном гидродинамическом генераторе кавитации (РГДГК) [17], обеспечивающем доизмельчение угольной массы, гомогенизацию суспензии, химическую активацию топлива.

При проведении экспериментов использовались две суспензии, составы которых даны в табл. 2.

Экспериментальные исследования процессов распыления ВУС осуществлялись на стенде [18], принципиальная схема которого представлена на рис. 2. Пневматическая форсунка (рис. 3) [15] размещалась в центре на продольной оси аэродинамического имитатора камеры сгорания котла [19]. На форсунку ВУС подавалась с помощью пневматического насоса при избыточном давлении (P_F) не более 0,04 МПа. Давление P_A — воздуха (P_A) составляло 0,4 МПа.

Таблица 1

Компоненты ВУС		
Компонент	Характеристика	Значение
Бурый уголь	Размер частиц, мкм	200
	Выход летучих, %	47
	Зольность, %	5,3
	Влажность, %	26
	Содержание серы, %	0,27
Вода	Теплотворная способность, МДж/кг	17,6
	Плотность, кг/м ³	997
	рН	9,8
Пирогенетическая жидкость	Плотность, кг/м ³	1030
	рН	~ 2,3
	Теплотворная способность, МДж/кг	3,1

Таблица 2

Водоугольные суспензии

№ п/п	ВУС _{кол-во ПЖ}	С, мас. % (Масса, кг)		
		Уголь	Вода	ПЖ
1	ВУС ₀	50 (1,2)	50 (1,2)	0
2	ВУС ₁₀	45 (1,08)	45 (1,08)	10 (0,24)

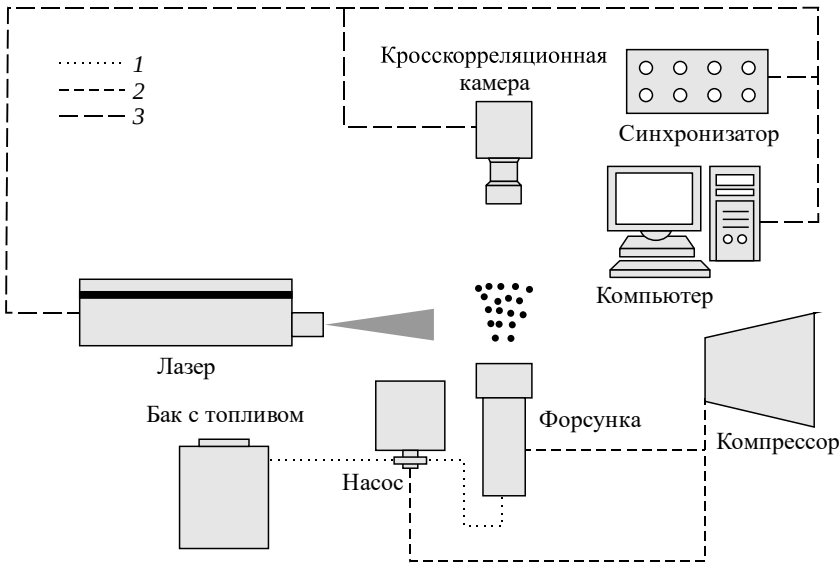


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального стенда.

1 — линии подачи топлива, 2 — линии подачи воздуха, 3 — линии управления.

Средний размер капель ВУС (δ) в струе после распыления определялся при помощи интерферометрического метода (Interferometric Particle Imaging, IPI) [20–23]. Метод IPI позволяет регистрировать мгновенные распределения размеров капель жидкостей в плоском поперечном сечении струи [23, 24]. В частности, этот метод хорошо зарекомендовал себя при исследованиях газокпельного течения при атомизации жидкого углеводородного топлива (дизельное топливо и отработанное моторное масло — непрозрачная жидкость) струей перегретого пара и воздуха [20].

Цифровой анализ полученных изображений дает возможность определить положение и размер капель. Метод IPI позволяет регистрировать как сферические, так и несферические капли [25, 26]. При измерении размера непрозрачных капель (в том числе капель ВУС) рассеянный свет содержит только свет, который отражается от их поверхности, т.е. излучатели, используемые для описания капли, распределяются только в положениях, которые непосредственно освещаются. Это означает, что рассеянный свет,

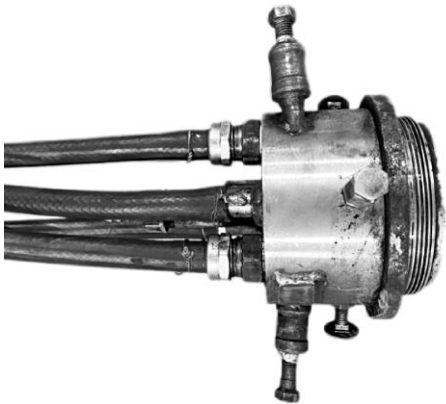


Рис. 3. Внешний вид пневматической форсунки [15].

собранный под углом рассеяния, содержит достаточно информации о размере капли с учетом утверждения, что частота интерференционных полос пропорциональна диаметру капли [27]. Регистрация скорости капель ВУС (v) осуществлялась методом цифровой трассерной визуализации (Particle Image Velocimetry, PIV). Эта техника измерений позволяет регистрировать мгновенные поля скоростей капель [28, 29]. Значения скоростей, диаметров и количество капель (N) ВУС вычислялись в программе ActualFlow [20–22].

Анализ диспергирования водоугольных суспензий в условиях высоких скоростей распыляющего агента выполнен с учетом двух определяющих параметров газокapельной струи — чисел Вебера (We) и Рейнольдса (Re). Отношение сил инерции ВУС к силам поверхностного натяжения определяется выражением [30]

$$We = \frac{\rho v^2 \delta}{\sigma},$$

где ρ — плотность воздуха, кг/м^3 , v — скорость воздуха, м/с , δ — характерный размер капли ВУС, м , σ — коэффициент поверхностного натяжения ВУС, Н/м .

В литературе [29–31] приводятся несколько типов дробления капель жидкости, характеризующиеся числом We :

- 1) вибрационное разрушение ($8 < We < 12$);
- 2) разрушение по типу «парашют» ($12 < We < 50$);
- 3) разрушение по типу «парашют со струйкой» ($50 < We < 100$);
- 4) срыв жидкого пограничного слоя с экватора капли ($100 < We < 350$);
- 5) срыв волн на наветренной поверхности капли ($350 < We < 1000$);
- 6) взрывное разрушение ($We > 350$).

Типы дробления капель в диапазоне изменения We от 12 до 100 принято считать неустойчивостью Релея–Тейлора [31]. В работе [31] отмечены четыре фактора, определяющие эффективность диспергирования жидкости в газовой струе:

- первичный распад жидкой струи на капли;
- вторичное дробление капель при $We > We_{кр}$ в момент их попадания в поток;
- период индукции разрушения для конкретного режима;
- соотношение времен разрушения капли (We) и времени скоростной релаксации (Re).

Поверхностное натяжение водоугольных суспензий (γ) измерялось автоматическим тензиометром (DCAT 9). Плотность водоугольных суспензий (ρ) определялась методом измерения массы контрольного объема.

Результаты и обсуждение

После приготовления ВУС (см. табл. 2) были проведены исследования их реологических свойств — поверхностного натяжения и плотности. Результаты измерений представлены в табл. 3.

В результате исследований поверхностного натяжения ВУС с добавками ПЖ установлено, что после введения в состав топливной смеси 10 % по массе пирогенетической жидкости значение поверхностного натяжения увеличивается на 22 % (в сравнении

Таблица 3
Поверхностное натяжение и плотность ВУС

Параметр	ВУС ₀	ВУС ₁₀
Поверхностное натяжение, Н/м	0,064	0,082
Плотность, кг/м^3	1190	1200

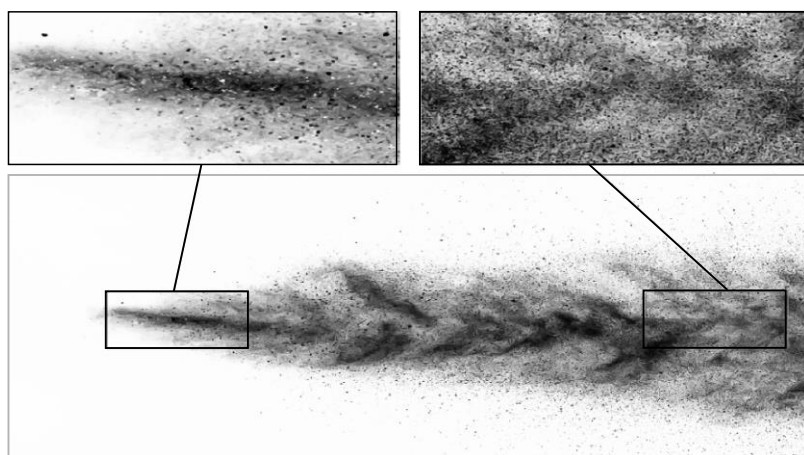


Рис. 4. Процесс распыления двухкомпонентной ВУС.

с двухкомпонентным водоугольным топливом). Плотность образцов ВУС изменялась незначительно.

Результаты высокоскоростной визуализации газокapельной струи позволили установить ее основные характеристики: размер капель ВУС, их концентрацию и скорость. На рис. 4 представлены кадры, иллюстрирующие процесс распыления двухкомпонентного водоугольного топлива пневматической форсункой.

На рис. 5 схематически показаны сечения и области струи, в которых осуществлялась регистрация капель ВУС для определения их размеров и концентрации.

Результаты экспериментальных исследований среднего размера капель после распыления ВУС в трех областях (I–III) струи хорошо иллюстрируют влияние ПЖ в составе суспензии на средний размер капель. На рис. 6 представлены кадры высокоскоростной съемки процессов распыления бурогоугольных суспензий пневматической форсункой с указанием значений средних размеров капель суспензии в областях I–III.

Средний размер капель двухкомпонентной ВУС₀ в области регистрации струи на отрезке 226–350 мм в сравнении с 0–100 мм снижается на 11 %, суспензии ВУС₁₀ — на 10 %. В целом капли наибольшего размера характерны для ВУС₁₀.

Анализ результатов (см. рис. 5) позволяет оценить влияние ПЖ в составе ВУС на изменение среднего размера капель в трех исследованных областях. Установлено, что средний размер капель суспензии ВУС₁₀ увеличивается в сравнении с ВУС₀: на 13 % в первой области исследования (0–100 мм), на 11 % во второй области исследования (101–225 мм), на 11 % в третьей области исследования (226–350 мм).

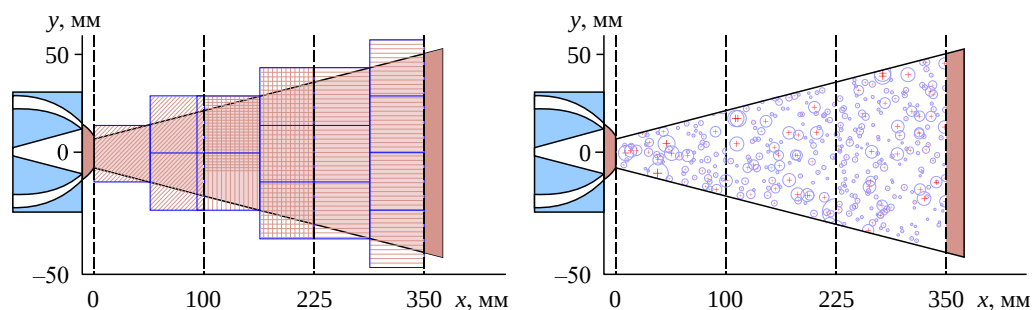


Рис. 5. Области регистраций капель ВУС в струе.

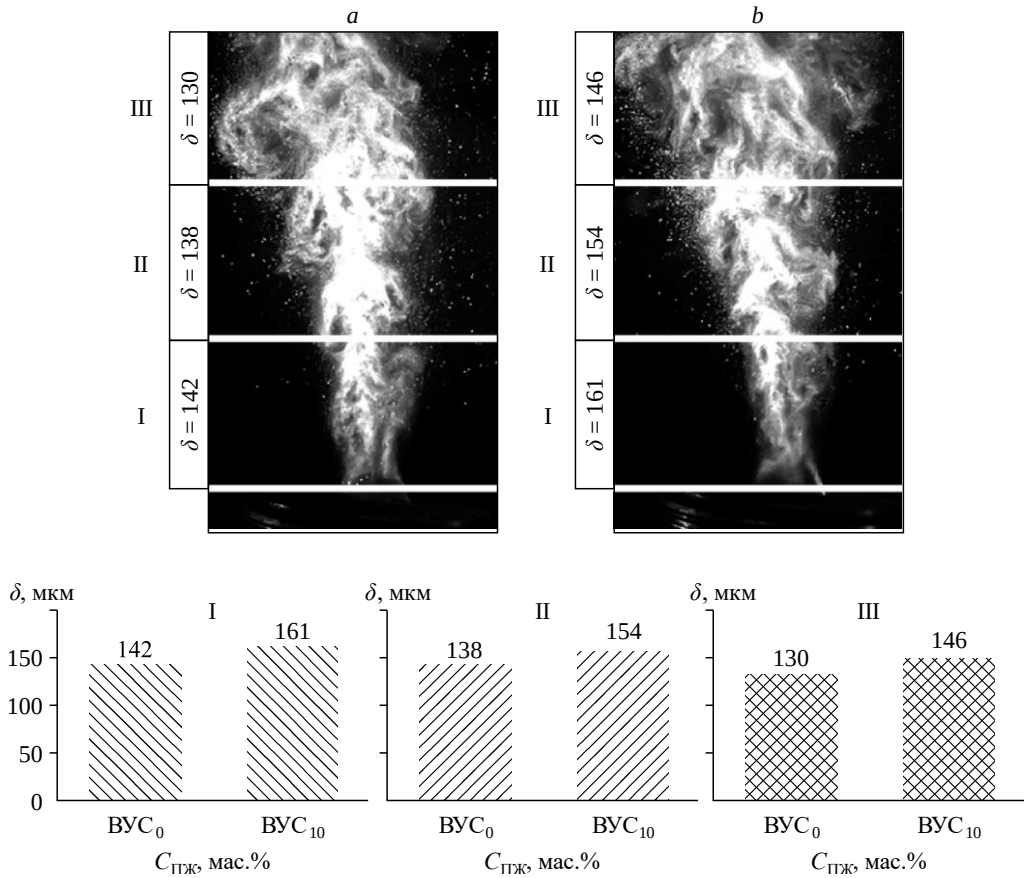


Рис. 6. Средний размер капель ВУС в областях струи.

I — на расстоянии 0–100 мм, II — на расстоянии 101–225 мм, III — на расстоянии 226–350 мм;
a — ВУС₀, *b* — ВУС₁₀.

Результаты исследований дисперсного состава струй ВУС представлены на рис. 7. Дисперсный состав капель ВУС в струе установлен в следующих характерных диапазонах значений размеров капель: менее 100 мкм, от 101 до 200 мкм, от 201 до 400 мкм, от 401 до 600 мкм, от 601 до 900 мкм, более 900 мкм.

Анализ результатов дисперсного состава газокapельной струи показал рост числа капель двухкомпонентной ВУС размерами до 400 мкм по мере удаления от сопла.

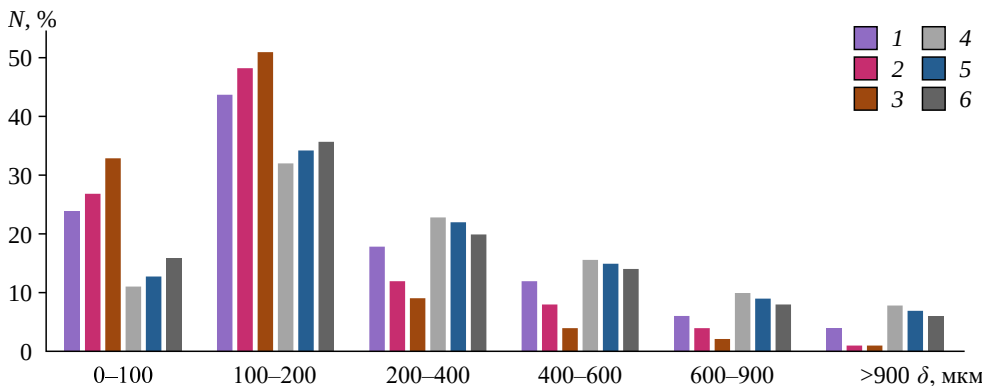


Рис. 7. Дисперсный состав струй ВУС.

1–3 — ВУС₀, 4–6 — ВУС₁₀; 1, 4 — 0–100 мм, 2, 5 — 101–225 мм, 3, 6 — 226–350 мм.

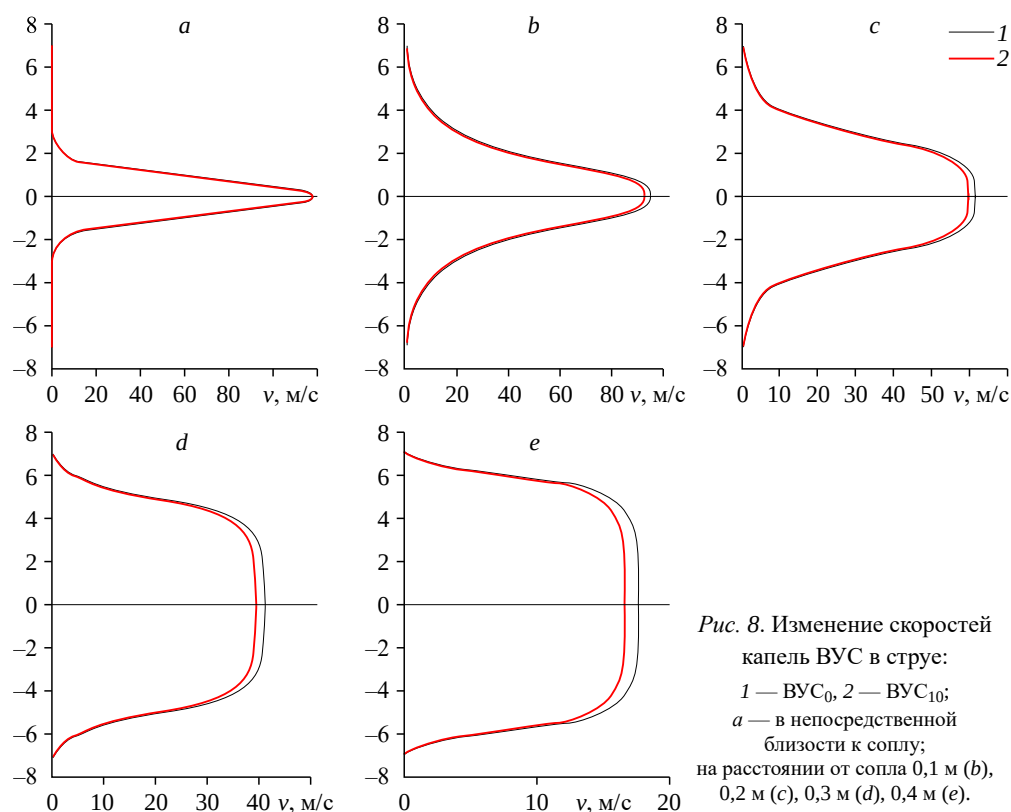


Рис. 8. Изменение скоростей каплей ВУС в струе:
 1 — ВУС₀, 2 — ВУС₁₀;
 а — в непосредственной близости к соплу;
 на расстоянии от сопла 0,1 м (b),
 0,2 м (c), 0,3 м (d), 0,4 м (e).

Аналогичная зависимость изменения концентрации каплей характерна для ВУС₁₀. При этом следует отметить, что количество каплей характерных диапазонов для ВУС₀ и ВУС₁₀ различается примерно в 2 раза. В процессе распыления суспензий возрастает число каплей малых размеров (менее 200 мкм) в результате их разрушения. Можно сделать вывод о влиянии ПЖ в составе ВУС на дисперсный состав струи. Оценивать устойчивость каплей ВУС в газокapельной струе целесообразно с учетом их скоростей. На рис. 8 приведены характерные профили скоростей, соответствующие газокapельной струе (см. рис. 4). Изменения скоростей каплей ВУС установлены для пяти поперечных сечений струи.

Рисунок 8а иллюстрирует максимальные установленные скорости газокapельной струи в непосредственной близости к соплу. Их значения для ВУС₀ и ВУС₁₀ различаются незначительно и в абсолютном выражении составляют 120 и 117 м/с соответственно. В области исследования вдоль продольной оси струи скорости каплей суспензии снижаются для двух суспензий в среднем на 85 % (до 16 м/с).

Результаты экспериментов (см. рис. 6а–6с) позволяют проанализировать изменение средних размеров каплей ВУС вдоль продольной оси струи. На рис. 9 приведены эти зависимости $\delta(x)$.

Средний размер каплей ВУС в струе с удалением от сопла изменяется по линейной зависимости, что хорошо для их практического использования.

При отсутствии оценок распада струи и каплей ВУС все заключения о дроблении каплей строятся на оценках чисел We по измерениям дисперсности струи и скоростей каплей (см. рис. 6, 7). Принимая во внимание типы дробления каплей жидкости, характеризующиеся числом We [30–32], и результаты изменений скоростей каплей ВУС (см. рис. 8),

Рис. 9. Средний размер капель вдоль продольной оси струи.

1 — ВУС₀, 2 — ВУС₁₀.

можно сделать вывод о дозвуковых режимах течения фаз в струе. Диапазон изменения чисел Вебера для таких струй — от 20 до 200. Зависимости изменения We вдоль продольной оси струи и от средних размеров капель ВУС приведены на рис. 10, 11. Установленные значения чисел Вебера позволяют говорить о том, что в исследованных струях ВУС возможна реализация режимов неустойчивости Релея–Тейлора. Последние характеризуются такими типами дробления капель, как «парашют» ($12 < We < 50$), «парашют со струйкой» ($50 < We < 100$) и срыв жидкого пограничного слоя с экватора капли ($100 < We < 350$). На рис. 10, 11 указанные диапазоны обозначены штриховыми линиями.

Малые значения чисел We (менее 12) в исследованных диапазонах скоростей можно объяснить небольшими размерами капель ВУС. Для капель более вязкой суспензии (ВУС₁₀) характерны лишь режимы дробления «парашют» и «парашют со струйкой» на значительных расстояниях от сопла. На близких расстояниях от форсунки (до 0,2 м) для скоростей фаз около 60 м/с наиболее характерно дробление капель по типу «парашют со струйкой». Для ВУС с меньшим поверхностным натяжением суспензии на близких расстояниях от сопла допустимо разрушение крупных капель (примерно 140 мкм) по типу «срыв жидкого пограничного слоя с экватора капли» (см. рис. 6).

Проведенные исследования диспергирования водоугольных суспензий — двухкомпонентной и с добавкой пирогенетической жидкости — после их распыления пневматической форсункой [15] показали влияние третьего компонента на процесс формирования газокapельной струи. Характерной особенностью является отсутствие типа дробления капель «срыв жидкого пограничного слоя с экватора капли» для ВУС₁₀. Анализ дисперсного состава газокapельных струй показал различие средних размеров капель такой суспензии в струе. Их размер в среднем на 10, 11 % больше, чем у двухкомпонентной ВУС. По значениям чисел We и диапазонам их изменения установлены характерные типы дробления капель ВУС в составе с пирогенетической жидкостью.

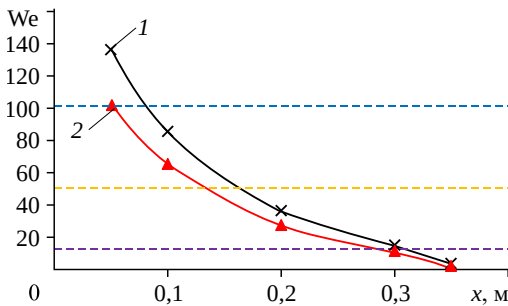
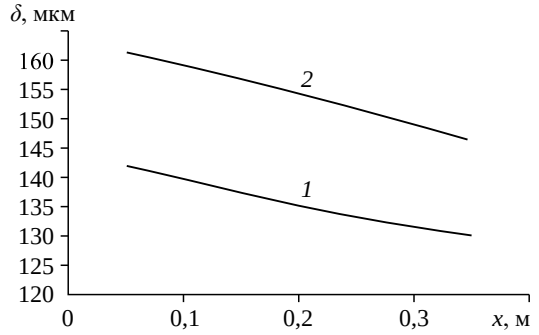


Рис. 10. Изменение числа We вдоль продольной оси струи.

1 — ВУС₀, 2 — ВУС₁₀.

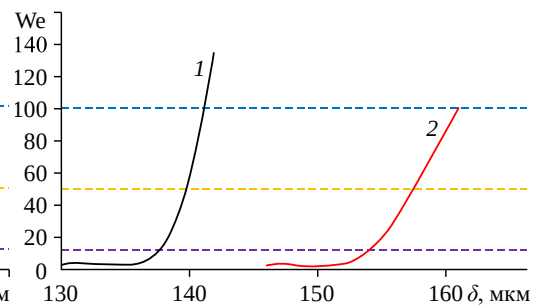


Рис. 11. Зависимость числа We от среднего размера капель ВУС.

1 — ВУС₀, 2 — ВУС₁₀.

Заключение

Экспериментально изучены характеристики трехкомпонентных суспензионных топлив, включающих уголь, воду и пирогенетическую жидкость. Показано, что поверхностное натяжение трехкомпонентной суспензии (уголь 30 %, вода 40 %, ПЖ 10 %) увеличивается на 22 % по сравнению с ВУС (50/50).

Исследованы процессы диспергирования водоугольных суспензий после распыления пневматической форсункой. При проведении экспериментов по диспергированию использовались оба вида суспензий: двухкомпонентная и трехкомпонентная. Рассмотрены параметры газокapельных потоков: геометрия двухфазной струи, профили скорости капель, дисперсный состав и концентрация спрея.

Экспериментально установлено, что средний размер капель водоугольных суспензий снижается на 11 % при удалении от сопла форсунки. Значения скоростей капель суспензии уменьшаются в среднем на 85 % (со 120 до 16 м/с). Получены зависимости чисел Вебера от параметров газокapельной струи. Доказано, что для водоугольной суспензии в составе с пирогенетической жидкостью характерно отсутствие типа дробления капель «срыв жидкого пограничного слоя с экватора капли». Для исследованных суспензий установлена возможность реализации режимов неустойчивости Релея – Тейлора, характеризующаяся такими типами дробления капель, как «парашют» и «парашют со струйкой». Полученные результаты позволяют оценивать межфазное взаимодействие капель двух типов водоугольных суспензий с момента их истечения из сопла до формирования мелкодисперсной газокapельной струи.

Список литературы

1. Deng O., Liu C., Yao M., Zhang Z. Study on pH change characteristics of coal-water slurry containing potassium permanganate under the action of H₂S // Desalination and Water Treatment. 2024. Vol. 317. P. 100116-1–100116-6.
2. Jiang B., Li J., Chen D., Wang L., Yang W. Synthesis and performance of sulfonated poly (styrene-alt-maleic anhydride) for coal-water slurry: The effect of structure on slurryability and stability // Colloids and Surf. A: Phys. and Eng. Aspects. 2024. Vol. 685. P. 133154-1–133154-7.
3. Bai Y., Song W., Liu Q. Study on motion behaviour of coal water slurry particles under vibration conditions // Heliyon. 2024. Vol. 10, Iss. 3. P. e24629-1–e24629-13.
4. Hille E. Europe's energy crisis: Are geopolitical risks in source countries of fossil fuels accelerating the transition to renewable energy? // Energy Economics. Part A. 2023. Vol. 127. P. 107061-1–107061-17.
5. Cherwoo L., Gupta I., Flora G. et al. Biofuels an alternative to traditional fossil fuels: A comprehensive review // Sustainable Energy Technol. and Assessm. 2023. Vol. 60. P. 103503-1– 103503-24.
6. Zhang K., Zhang Y., Zhou L. et al. Experimental and theoretical insight into the effect of a novel composite dispersant on the properties of coal pitch water slurry // Fuel. 2024. Vol. 365. P. 131281-1–131281-10.
7. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Fragmentation of heated droplets of coal-water slurries containing petrochemicals // Appl. Thermal Eng. 2021. Vol. 195. P. 117190-1–117190-12.
8. Dorokhov V.V., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Anthropogenic emissions from coal-water slurry combustion: Influence of component composition and registration methods // Environ. Research. 2023. Vol. 223. P. 115444-1–115444-9.
9. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Kaltaev A.Z. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste // Energy. 2022. Vol. 257. P. 124813-1–124813-15.
10. Wang J., Wang S., Liu J. et al. Eco-friendly utilization of waste oil for preparing coal water slurry: Additive suitability and dispersion mechanism // Fuel. 2023. Vol. 333, P. 1. P. 126314-1–126314-21.
11. Sharma S.K., Jones A.R. Radiative transfer characteristics of clouds of atomised coal water slurry drops in a furnace // Fuel. 2002. Vol. 81, Iss. 1. P. 59–63.
12. Gaber C., Wachter P., Demuth M., Hochenauer C. Experimental investigation and demonstration of pilot-scale combustion of oil-water emulsions and coal-water slurry with pronounced water contents at elevated temperatures with the use of pure oxygen // Fuel. 2020. Vol. 282. P. 118692-1– 118692-12.

13. Alekseenko S.V., Dekterev A.A., Maltsev L.I., Kuznetsov V.A. Implementation of a three-stage scheme for the co-combustion of pulverized coal and coal-water slurry in an industrial boiler to reduce NOx emissions // Process Safety and Environ. Protection. 2023. Vol. 169. P. 313–327.
14. Jianxin D., Zeliang D., Houming Z., Yuanqiang T. Performance and wear characteristics of ceramic, cemented carbide, and metal nozzles used in coal–water–slurry boilers // Intern. J. Refractory Metals and Hard Mater. 2009. Vol. 27, Iss. 5. P. 919–926.
15. Пат. 2346756 РФ, МПК B05B 7/08 Пневматическая форсунка / Мальцев Л.И.; заявитель и патентообладатель Ин-т теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, ООО Агентство "Городок". № 2007118139/12; заявл. 15.05.2007; опубл. 20.02.2009, Бюл. № 5.
16. Shadrin E.Yu., Anufriev I.S., Butakov E.B., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Maltsev L.I., Sharypov O.V. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner // Fuel. 2021. Vol. 303. P. 121182–1–121182–11.
17. Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Мальцев Л.И., Поджаров Ю.С. Влияние кавитационной обработки на свойства водоугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости // iPolytech J. 2023. Т. 27, № 2. С. 297–309.
18. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Kondakov A.A., Maltsev L.I., Podzharov Yu.S. Experimental and numerical studies of the processes of spraying coal-water slurries with pneumatic nozzle // Chem. Eng. Res. and Design. 2024. Vol. 209. P. 1–11.
19. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V. Improvement of atomization characteristics of coal-water slurries // Energy. 2021. Vol. 230. P. 120900–1–120900–14.
20. Anufriev I.S., Shadrin E.Yu., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharypov O.V. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet // Appl. Thermal Eng. 2019. Vol. 163. P. 114400–1–114400–12.
21. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Dekterev A.A., Kuznetsov V.A., Maltsev L.I., Minakov A.V., Shadrin E.Yu., Chernetskiy M.Yu., Sharypov O.V. Experimental and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension fuel // Intern. J. Heat and Fluid Flow. 2019. Vol. 77. P. 288–298.
22. Alekseenko S.V., Bilsky A.V., Dulin V.M., Markovich D.M. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates // Intern. J. Heat and Fluid Flow. 2007. Vol. 28, Iss. 6. P. 1340–1359.
23. Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М. Интерферометрический метод измерения диаметров капель // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 1. С. 1–13.
24. Ложкин Ю.А., Маркович Д.М., Пахомов М.А., Терехов В.И. Исследование структуры полидисперсной изотермической газокapельной струи на начальном участке. Эксперимент и численное моделирование // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 3. С. 309–324.
25. Sun J., Zhang H., Li J., Zhou Y., Jia D., Liu T. Hybrid spherical particle field measurement based on interference technology // Measurement Sci. and Technology. 2017. Vol. 28, No. 3. P. 1–7.
26. Ruiz S.G., Vetrano M.R., van Beeck J. Feasibility of using glory and speckle patterns for sizing spherical and irregular particles // Appl. Optics. 2014. Vol. 53, Iss. 21. P. 4722–4728.
27. Van de Hulst H.C. Light scattering by small particles. N.Y.: Wiley, 1957. 470 p.
28. Garafolo N.G., Wittmer J., Pathak S. Curvature correction applied to droplets subjected to natural convection for particle image velocimetry // Colloids Surf., A. Physicochem. Eng. Asp. 2020. Vol. 597. P. 124442–1–124442–28.
29. Raffel M., Willert C.E., Scarano F., Köhler C.J., Wereley S.T., Kompenhans J. Particle image velocimetry. Cham: Springer Intern. Publ., 2018. 665 p.
30. Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Натанзон М.С., Косов Д.М. Режимы дробления капель и критерии их существования // Инж.-физ. журн. 1981. Т. 40, № 1. С. 64–70.
31. Бойко В.М., Нестеров А.Ю., Поплавский С.В. Диспергирование жидкости в высокоскоростных коаксиальных газовых струях // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 3. С. 417–431.
32. Gelfand B.E. Droplet breakup phenomena in flows with velocity lag // Progress Energy Combustion. Sci. 1996. Vol. 22. P. 201–265.

*Статья поступила в редакцию 9 апреля 2024 г.,
после доработки — 16 мая 2024 г.,
принята к публикации 13 июня 2024 г.*