



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ СУСПЕНЗИОННОГО ТОПЛИВА И ВОЗДУХА НА СТРУКТУРУ ФАКЕЛА В ПРОЦЕССЕ РАСПЫЛА

Д.В. Гвоздяков, А.В. Зенков, В.Е. Губин, М.В. Ведяшкин

Национальный Исследовательский Томский Политехнический университет,  
г. Томск, Россия  
dim2003@tpu.ru

**Резюме:** Представлены результаты экспериментальных исследований процесса пневмомеханического распыла суспензионного топлива с пластификатором в аэродинамическом имитаторе топки энергетического котла. Выполнен анализ современного состояния в области исследования процессов распыла суспензионных топлив. Проанализировано влияние давления суспензионного топлива и воздуха на структуру формирующегося факела. Определены значения характерных размеров трех зон факела: сердцевина, средняя и внешняя зоны. Экспериментально подтверждено влияние давления распыляемого суспензионного топлива и воздуха на период формирования стабильной структуры факела и геометрические характеристики зон. Выделены диапазоны скоростей и размеров капель в потоке при различных давлениях. Получены количественные значения капель суспензионного топлива, обладающих различными скоростями, в процессе его пневмомеханического распыла. Установлено, что наибольшее число частиц в области исследования обладают скоростями до 8 м/с; значительное количество капель (до 20%) имеют скорости от 8 до 32 м/с; для 1% капель характерны скорости 32 м/с и более. При обработке результатов не учитывались образующиеся частицы-аэрозоли размером 1 мкм и менее. Определены значения критерия *We* для соответствующих размеров и скоростей капель распыляемого суспензионного топлива. Установлено, что значительная часть капель претерпевает катастрофическое дробление, характерное при значениях чисел *We* от 7800 и более. Полученные результаты могут быть использованы при математическом и физическом моделировании процесса распыла суспензионных топлив в топках энергетических котлов с целью прогностических оценок аэродинамических характеристик проектируемых и действующих агрегатов.

**Ключевые слова:** суспензионное топливо; распыл; водоугольное топливо; число Вебера; факел распыла.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

**Для цитирования:** Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Губин В.Е., Ведяшкин М.В. Экспериментальные исследования влияния давления суспензионного топлива и воздуха на структуру факела в процессе распыла // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т.21. №5. С.110-123. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-110-123.

## EXPERIMENTAL STUDIES OF THE INFLUENCE OF PRESSURE OF SLURRY FUEL AND AIR ON THE SPRAY CONE STRUCTURE DURING ATOMIZATION

DV Gvozdyakov, AV Zenkov, VE Gubin, MV Vedyashkin

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia  
dim2003@tpu.ru

**Abstract:** Results of experimental studies of pneumomechanical atomization process of slurry fuel with a plasticizer in an aerodynamic simulator of power boiler furnace are presented. Analysis of the current state in the field of research of slurry fuel atomization processes has been conducted. Influence of pressure of slurry fuel and air on the structure of the emerging spray cone have been

analyzed. The values of characteristic dimensions of three zones of spray cone have been determined: core, middle and outer zones. Effect of pressure of the sprayed slurry fuel and air on the period of stable spray cone formation and geometric characteristics of the zones has been experimentally confirmed. Ranges of velocities and sizes of droplets in the flow at various pressures have been distinguished. The quantitative values of slurry fuel droplets with different velocities in the process of its pneumatic spraying have been obtained. It has been established that the largest number of particles in the study area have velocities up to 8 m/s; a significant number of droplets (up to 20%) have velocities from 8 to 32 m/s; velocities of 32 m/s and more are typical for 1% of droplets. During the results processing, aerosol particles with a size of 1 micron or less have not been taken into account. The values of We criterion for the respective sizes and velocities of the sprayed fuel droplets have been determined. It has been established that significant part of the droplets undergoes catastrophic crushing, which is characteristic for the values of We numbers from 7800 and higher. The obtained results can be used for mathematical and physical modeling of the process of slurry fuels atomization in the furnaces of power boilers in order to predict the aerodynamic characteristics of the designed and existing units.

**Keywords:** slurry fuel; atomization; coal-water fuel; Weber number; spray cone.

**Acknowledgments:** The work was performed as part of the program to improve the competitiveness of Tomsk Polytechnic University.

**For citation:** Gvozdyakov DV, Zenkov AV, Gubin VE, Vedyashkin MV. Experimental studies of the influence of pressure of slurry fuel and air on the spray cone structure during atomization. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(5):110-123. (In Russ). doi:10.30.724/1998-9903-2019-21-5-110-123.

## Введение

Усиление безопасности России в области энергетической безопасности в будущем будет опираться на объемы использования угля в качестве основного топлива тепловых электрических станций (далее ТЭС) [1, 2]. Из-за проведения ошибочной энергетической политики в период 80-90-х годов большая часть ТЭС использует в качестве основного топлива природный газ и мазут. Так, доля природного газа составляла 61,8%, мазута 8,6% а угля только 29,6% в топливном балансе ТЭС в 1998 г. В европейской части России доля газа достигала 90-92% [3]. Благодаря данной энергетической стратегии, с 2006 г. в России существует дефицит энергии и возможности ее производства. В настоящее время в стратегию вносятся коррективы для преодоления кризисной ситуации, связанные с пересмотром доли угля в общем энергетическом балансе [4]. Планируется в десятки раз увеличить использование угольного топлива для тепло- и электрогенерации. Известно, что использование угля в качестве топлива ТЭС влечет ряд пока не решенных проблем: образование золы и токсичных продуктов сгорания ( $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$ ) [5].

На сегодняшний день существует ряд технологических решений, обеспечивающих повышение энергоэффективности сжигания угля: циркулирующий кипящий слой, в среде низкотемпературной плазмы, с использованием высоко- и низкотемпературных закрученных потоков, жидкошлаковый расплав и др. Но одним из наиболее перспективных направлений является технология сжигания угля в составе суспензионных топлив [3, 4]. Суспензионное топливо, например, водоугольное (далее ВУТ), представляет собой жидкую смесь из двух и более компонентов в различных пропорциях, один из которых обязательно является горючим элементом (каменный и бурый угли, торф, отходы углеобогащения, нефтяной кокс и пр.) [1]. Однако, существует ряд актуальных задач, решение которых необходимо для распространения данной технологии: определение физических механизмов процессов распыла и дробления капель водоугольного топлива и математическое моделирование данных процессов [6, 7].

В настоящее время исследованиям распыления суспензионных топлив уделяется мало внимания. Распыление в целом активно изучалось в 1980-х годах (по большей части вода, керосин, дизель и другие масла при температуре окружающего воздуха) [8, 9].

Ввод в топку легких топлив при температуре окружающей среды обычно подходит для эффективного сжигания [10]. Некоторые топлива требуют подогрева [11]. В последние годы проведен ряд исследований, направленных на изучение распыления подогретых топлив [12-18].

Urbán A., et al. [10] утверждают, что геометрические параметры форсунки имеют незначительное влияние на формирования факела распыла при струйном распылении. Авторы установили, что повышение температуры вязкой жидкости перед распылением приводит к улучшению характеристик распыла. Однако существует определённый предел кинематической вязкости, называемый предельной вязкостью. Дальнейшее увеличение температуры топлива оказывает незначительный эффект на зависимость размера капли от скорости, а сам факел распыла становится более однородным.

Известен ряд исследований, направленных на улучшение реологических свойств суспензионных топлив, особенно - седиментационной устойчивости [19]. В работах [20-22] исследовалась эффективность процесса горения ВУТ для обеспечения более простого зажигания и стабильного горения капель водоугольного топлива. Особое внимание уделяется использованию горючих добавок при производстве ВУТ для снижения температуры зажигания топлива и повышения стабильности его горения [23-27]. С целью улучшения характеристик горения ВУТ используется предварительная обработка. Например, механическая [27], поточное испарение [28], лазерными импульсами [29].

Авторами [30] проведены исследования, направленные на изучение оптимальных параметров распыла водоугольного топлива. Поскольку вязкость является ключевым фактором для характеристик распыления, использованы силиконовые масла различной вязкости в качестве тестируемых жидкостей, чтобы изучить влияние различных параметров на характеристики распыления. Результаты показывают, что, когда отношение газа к жидкости высокое, скорость частиц на центральной оси ниже, чем при условии низкого соотношения газ-жидкость; аналогично, скорость в радиальных положениях выше, чем в случае с высокой вязкостью. Скорость также увеличивается с увеличением радиального расстояния от оси и уменьшается по мере увеличения соотношения газ-жидкость. С другой стороны, распределение скоростей не изменяется после того, как радиальное расстояние достигает определённого предела. Этот предел уменьшается с увеличением осевой длины. Увеличение вязкости увеличивает силу инерции жидкости. Таким образом, необходимо увеличить импульс распыляющего газа, чтобы создавалось достаточное напряжение сдвига в жидкости, и улучшались характеристики распыления.

В работе [31] представлены результаты экспериментальных исследований характеристик распыления ВУТ с помощью двух-поточной форсунки. Изучались следующие характеристики: угол распыления, скорость поля потока и распределение частиц по размерам. Результаты показали, что соотношение газ-жидкость и вязкость являются основными параметрами, влияющими на характеристики распыления высоковязких жидкостей. Установлено, что угол распыла увеличивается с увеличением соотношения газ-жидкость. Размер частиц высоковязких капель выражен через средний диаметр по Заутеру (диаметр, взвешенный по удельной поверхности).

Целью настоящей работы является проведение экспериментальных исследований структуры потока распыляемого суспензионного топлива в составе с пластификатором-лигносульфонатом в зависимости от давлений, анализ распределения капель по скоростям, их количеству и размеру.

#### **Методика исследования**

На рис. 1 представлена экспериментальная установка по исследованию структуры факела распыла суспензионного топлива и процессов дробления капель. Пневмомеханический распыл суспензионного топлива осуществляется форсункой 1, расположенной в аэродинамическом имитаторе топки 2. Суспензионное топливо нагнетается при помощи мембранного насоса с пневмоприводом 3 из бака запаса 4 ёмкостью  $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ . Объём суспензионного топлива для проведения эксперимента составлял  $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ . Распыляющий агент (воздух) нагнетается компрессором 5. Поток распыляемого суспензионного топлива подсвечивается «ножом», создаваемым лазером 6. Регистрация структуры факела и компонент (капли топлива) осуществляется высокоскоростной кросскорреляционной камерой 7. Пневмомеханическая форсунка 1 конструктивно выполнена с камерой внутреннего смешения распыляемой среды и агента (воздух). Диаметр сопла форсунки составляет  $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , что позволяет исследовать процесс распыла топлив с твёрдыми компонентами размером до  $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Также, возможно использовать в составе суспензионного топлива частицы со следующими геометрическими формами: параллелепипед (измельченный уголь), сфера (гранулы полимеров), цилиндр (волокна синтетических материалов и веществ растительного происхождения).

При проведении эксперимента использовался каменный уголь фракции  $200 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  и менее. Соотношение компонент суспензионного топлива – 50% уголь и 50% вода. В качестве пластификатора применялся лигносульфонат в количестве 1% от массы угля.

Исследования выполнены при следующих значениях давления суспензионного топлива и воздух (суспензионное топливо/воздух): 0,2 МПа/0,18 МПа; 0,3 МПа/0,28 МПа; 0,4 МПа/0,38 МПа. Давление воздуха устанавливалось на 0,02 МПа меньше с целью исключения «задавливания» воздухом топлива в форсунке, по причине значительной вязкости последнего. Камера расположена на расстоянии 0,5 м от оси факела (как показано на рис. 1).

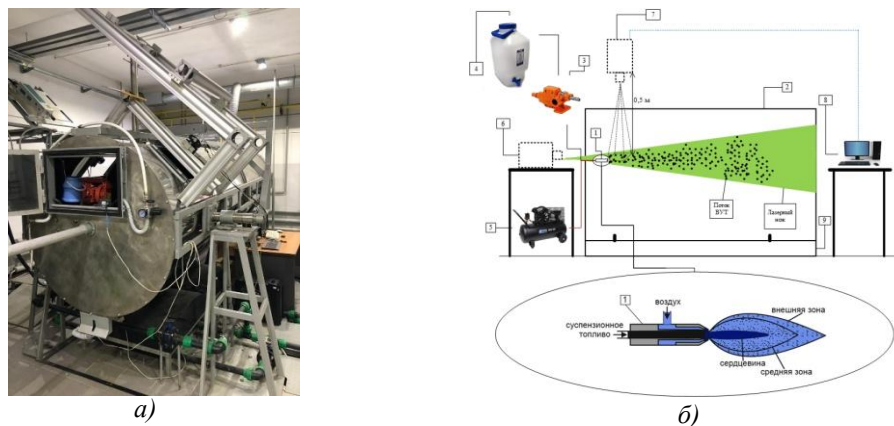


Рис. 1. Экспериментальная установка:

а – общий вид; б – принципиальная модель

1 – форсунка, 2 – аэродинамический имитатор топки, 3 – мембранный насос с пневмоприводом, 4 – бак запаса суспензионного топлива, 5 – компрессор, 6 – лазер, 7 – высокоскоростная камера, 8 – компьютер, 9 – бак сбора отработанного суспензионного топлива

Оценка эффекта дробления капель суспензионного топлива в процессе распыла выполнена в соответствии с [32] по одному из основных параметров – критерию Вебера  $We$ :

$$We = \frac{\rho \cdot D \cdot w^2}{\sigma},$$

где  $\rho$  – плотность суспензионного топлива,  $\text{кг/м}^3$ ;  $D$  – характерный размер, м;  $w$  – скорость капель суспензионного топлива, м/с;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $\text{кг/с}^2$ .

Экспериментальные исследования выполнены при следующих условиях и допущениях:

- при оценке числа  $We$  не учитывался эффект вращения капель суспензионного топлива в процессе распыла;
- в качестве характерного размера принимался размер капель;
- коэффициент поверхностного натяжения суспензионного топлива принимался  $0,06 \text{ кг/с}^2$ ;
- не учитывались внешние факторы – давление и температура внутри аэродинамического имитатора топки (нормальные условия);
- термическая подготовка суспензионного топлива не проводилась.
- цифровая трассерная визуализация осуществлялась при помощи одной кросскорреляционной камеры.

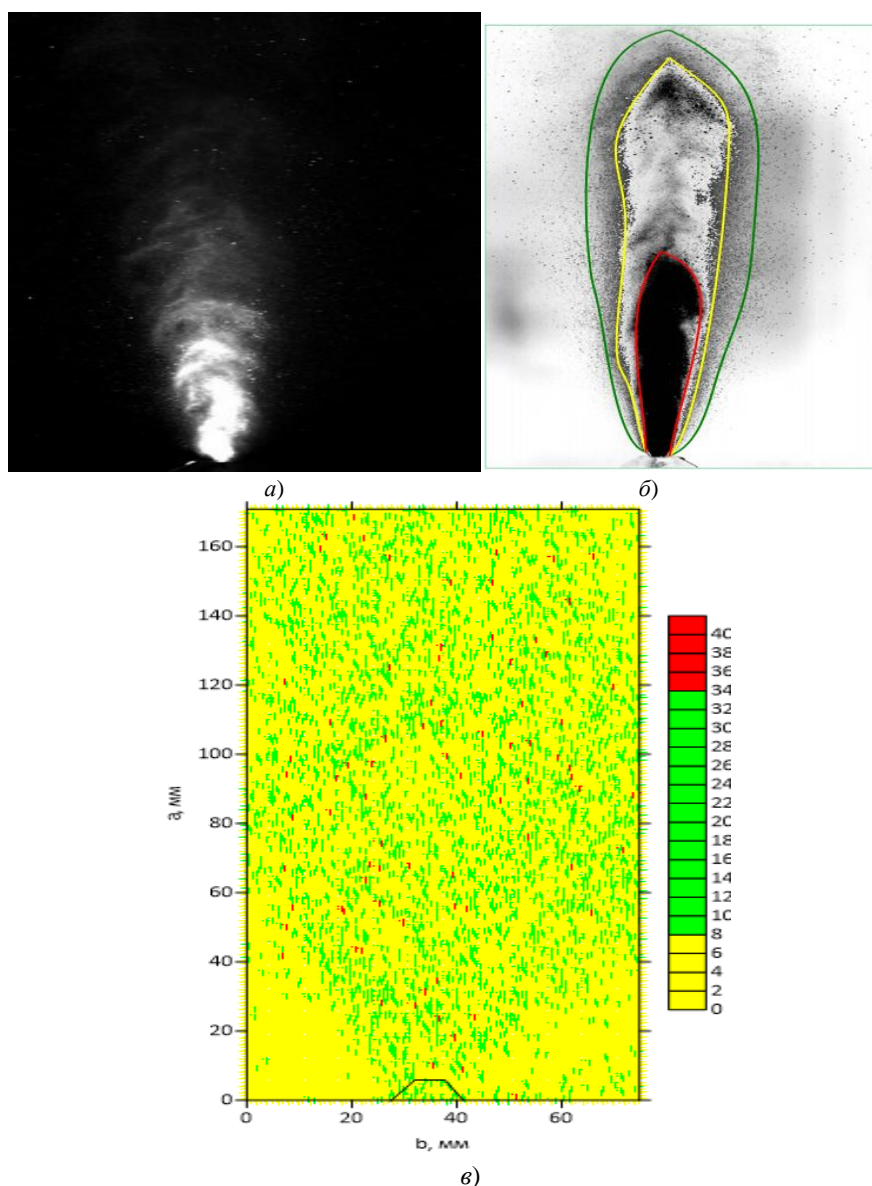
Полученные результаты (размер капель) при распыле суспензионного топлива обработаны в векторном редакторе. Оценка скорости капель осуществлялась при помощи бесконтактного метода измерения скорости в потоках  $PIV$  (Particle Image Velocimetry) – метод цифровой трассерной визуализации.

### Результаты и их обсуждение

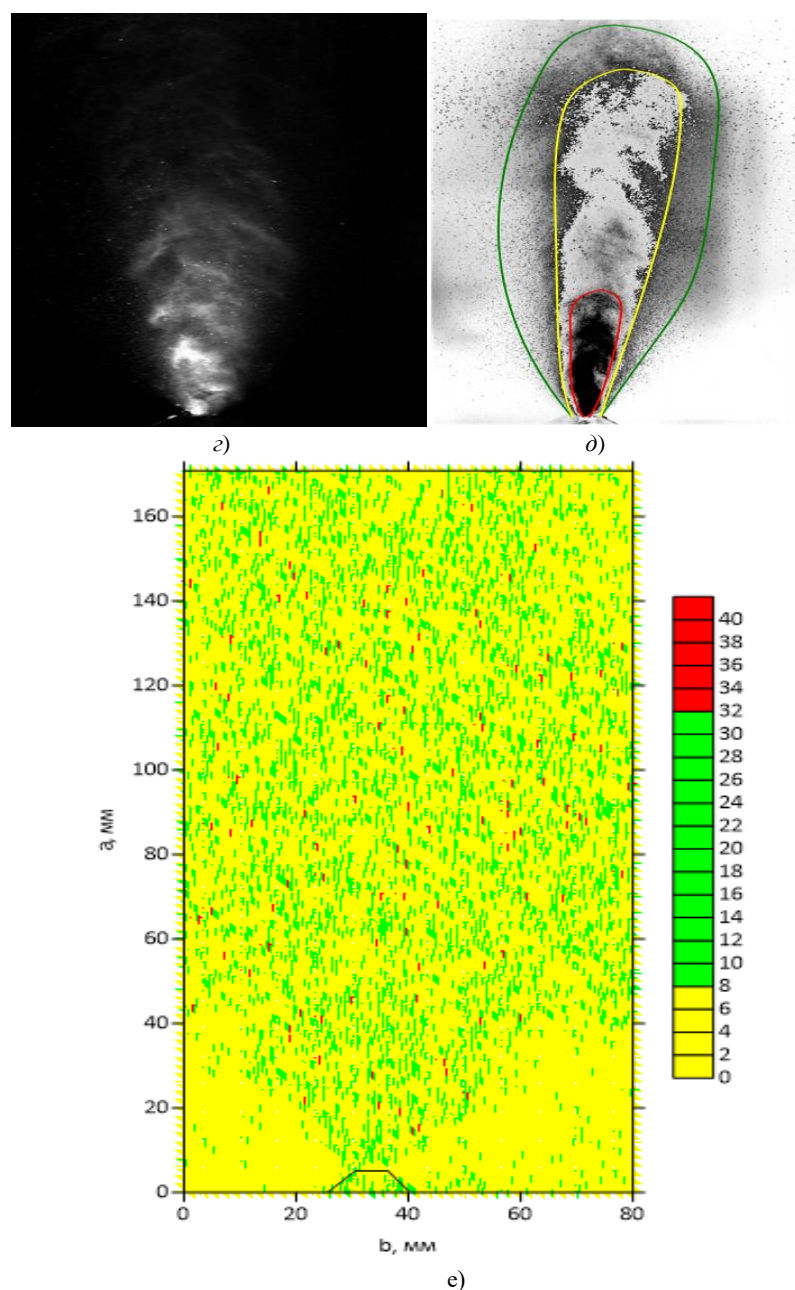
Проведены экспериментальные исследования процесса пневмомеханического распыла суспензионного топлива в составе с пластификатором-лигносульфонатом в зависимости от давления, проанализированы распределения капель по скоростям, их количеству и размеру. Результаты позволили проанализировать влияние давления суспензионного топлива и воздуха на структуру потока. Получены качественные и количественные результаты распределения скоростей капель. Выделены три характерных диапазона скоростей капель в потоке. Установлены геометрические параметры характерных зон факела, формирующихся в процессе пневмомеханического распыла суспензионного топлива. Результаты экспериментальных исследований структуры факела позволяют сделать несколько выводов: во-первых, при различных значениях давления суспензионного

топлива и воздуха протяженность и ширина сердцевины потока, средней и внешней зон значительно отличаются; во-вторых, распределение капель по скоростям в потоке неоднозначно. Так, в исследуемой области (для трех анализируемых соотношений давлений суспензионного топлива и воздуха) наибольшее количество капель обладают скоростями от 0 до 8 м/с, что составляет 81% от общего числа, значением скоростей от 8 до 32-34 м/с обладают, по меньшей мере, 18% частиц, диапазону скоростей от 32-34 до 41 м/с соответствуют 0,4%. Определены геометрические параметры капель суспензионного топлива в процессе пневмомеханического распыла. Установлено, что размер капель и частиц в потоке изменяется значительно. При обработке результатов не учитывались образующиеся аэрозоли размером менее 1 мкм. В потоке определены две категории размера капель. Результаты визуализации экспериментов представлены на рис. 3-5.

На рис. 2 представлены результаты экспериментальных исследований структуры потока суспензионного топлива в процессе пневмомеханического распыла (*первый эксперимент*), характерные для стабильного факела.



Наименование	Минимум, м/с	Максимум, м/с	%	Количество капель, шт.
Диапазон скорости 1	0	8	81,6	65642
Диапазон скорости 2	8	34	18,2	14608
Диапазон скорости 3	34	40,41	0,3	214



Наименование	Минимум, м/с	Максимум, м/с	%	Количество капель, шт.
Диапазон скорости 1	0	8	81,6	70237
Диапазон скорости 2	8	32	17,8	15299
Диапазон скорости 3	32	40,03	0,6	492

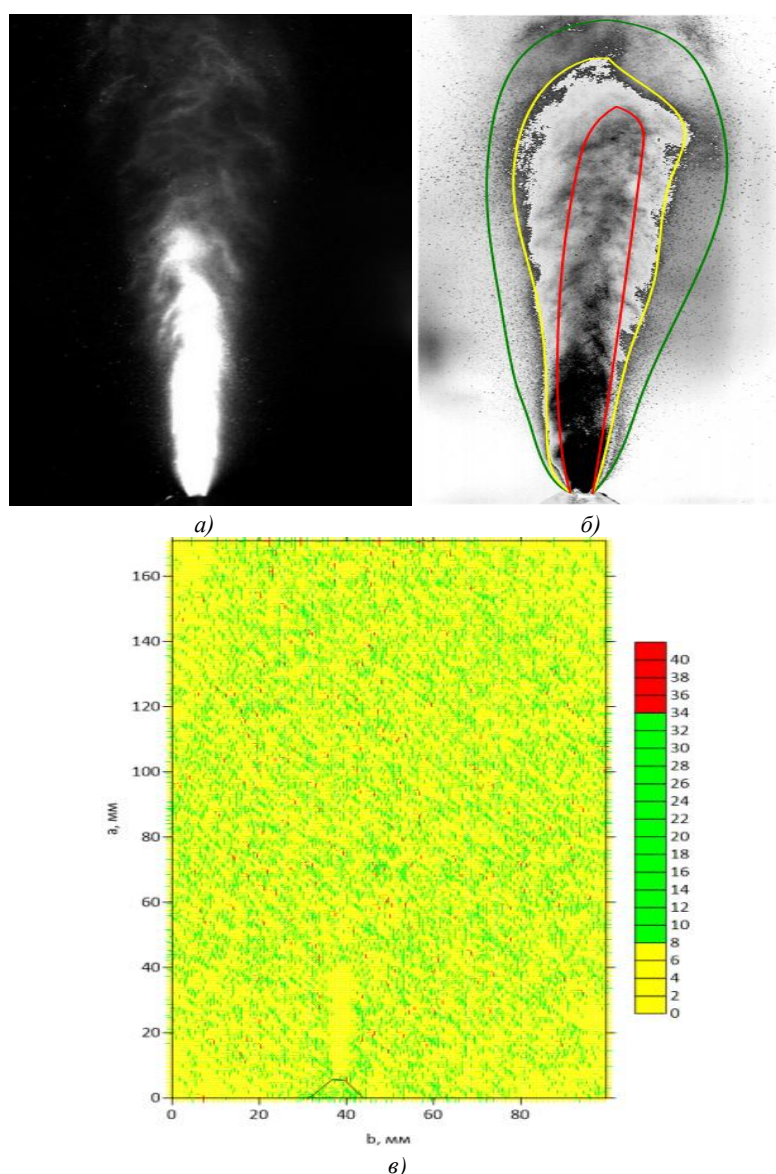
Рис. 2. Структура потока и параметры при давлениях суспензионного топлива и воздуха 0,2 МПа/0,18 МПа

На рисунке 2а и 2б представлены два снимка, характерных для стабильного факела. Время распыла суспензионного топлива при соотношении давлений 0,2 МПа/0,18 МПа составило 120 °С. Протяженность области исследования по оси факела составляла 0,17 м. Уже через 10-15 с момента начала эксперимента структура и параметры факела изменялись незначительно (стабильный факел). Установлено, что в процессе пневмомеханического распыла формируется факел с ярко выраженными зонами – сердцевиной потока, средней и внешней зонами (рис. 2б и 2д). Их протяженность –  $L$  и ширина –  $S$  (в самом широком сечении перпендикулярно оси факела) составили: сердцевина потока –  $L$  до 0,08 м,  $S$  до 0,01 м (выделена красной линией); средняя зона –  $L$  до 0,13 м,  $S$  до 0,02 м (выделена желтой линией); внешняя зона –  $L$  до 0,17 м,  $S$  до 0,05 м (выделена зеленой линией). Выделены три характерных диапазона скоростей капель в потоке: от 0 до 8 м/с, от 8 до 32 м/с и от 32-40,03 м/с. На рис. 2в и 2е представлено качественное распределение

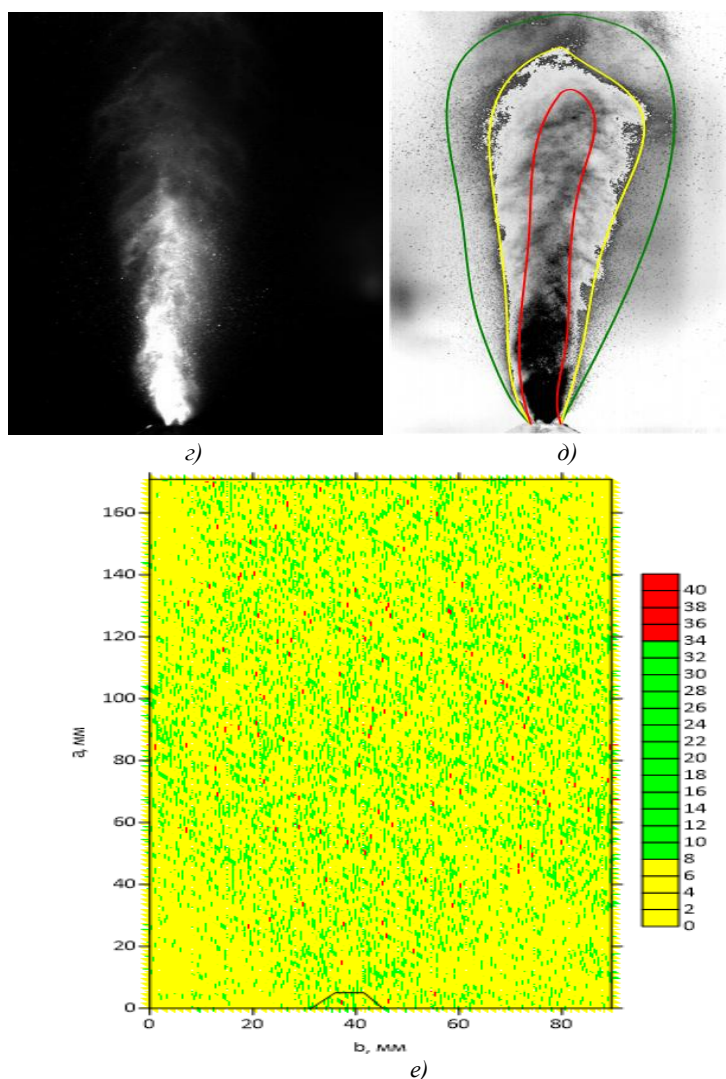


капель суспензионного топлива в процессе пневмомеханического распыла. Установлено, что капли, обладающие максимальными скоростями от 32-40,03 м/с (диапазон скорости 3), распределены по всей области исследования (на рис. 3в и 3е выделены красными символами). При этом их количество изменяется от 214 до 492, что составляет не более 1% от общего числа зафиксированных частиц. Для второго диапазона характерны капли, скорости которых изменяются от 8 до 32 м/с в количестве близком к 15 000 (18% от общего числа зафиксированных частиц; на рис. 2в и 2е выделены зелеными символами). Наибольшее количество (до 70 200, почти 82% от общего числа зафиксированных частиц; распределены по желтому фону) капель распыляемого суспензионного топлива обладают скоростями до 8 м/с.

На рис. 3 представлены результаты экспериментальных исследований структуры потока суспензионного топлива в процессе пневмомеханического распыла (*второй эксперимент*), характерные для стабильного факела. Время распыла суспензионного топлива при соотношении давлений 0,3 МПа/0,28 МПа составило 120 °С. Протяженность области исследования по оси факела составляла 0,17 м. Уже через 15-20 °С момента начала эксперимента структура и параметры факела изменялись незначительно (стабильный факел).



Наименование	Минимум, м/с	Максимум, м/с	%	Количество капель, шт.
Диапазон скорости 1	0	8	79,6	85171
Диапазон скорости 2	8	34	20,2	21583
Диапазон скорости 3	34	40,41	0,2	246



Наименование	Минимум, м/с	Максимум, м/с	%	Количество капель, шт.
Диапазон скорости 1	0	8	80,6	77658
Диапазон скорости 2	8	34	19,1	18434
Диапазон скорости 3	34	40,41	0,2	208

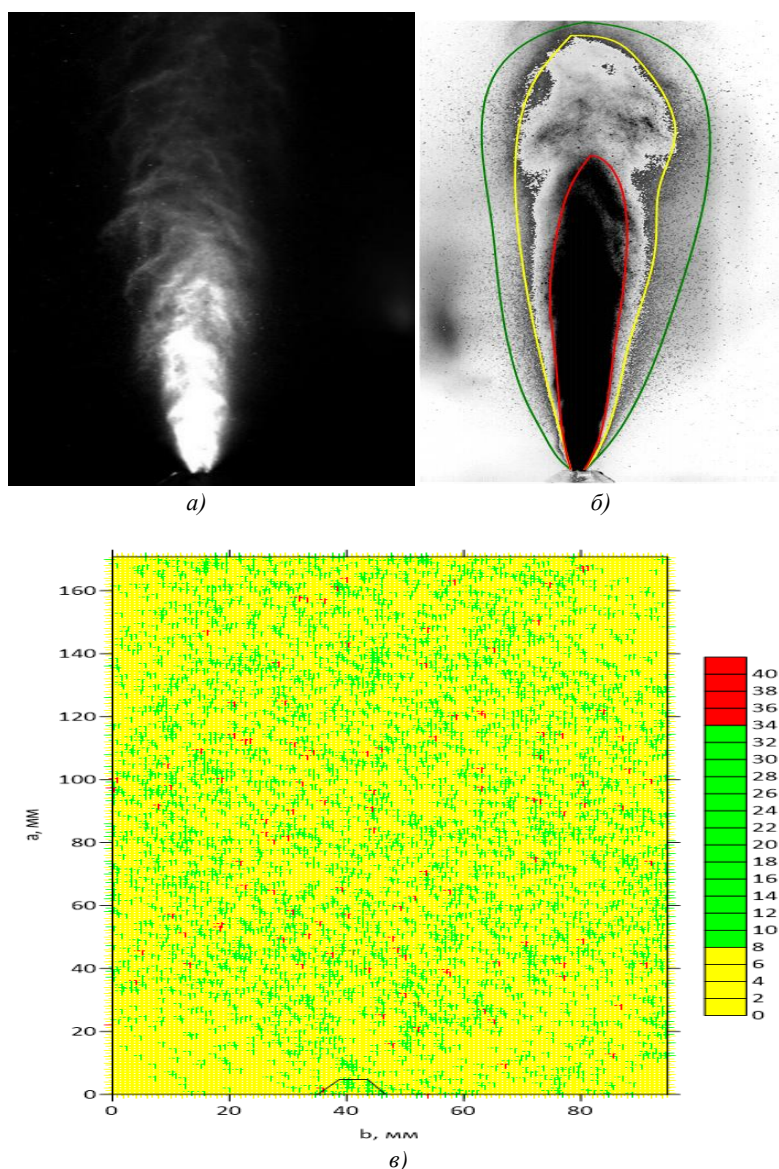
Рис. 3. Структура потока и параметры при давлениях суспензионного топлива и воздуха 0,3 МПа/0,28 МПа

Установлено, что в процессе пневмомеханического распыла формируется факел с ярко выраженными зонами: сердцевинной потока –  $L$  до 0,13 м,  $S$  до 0,015 м; средняя зона –  $L$  до 0,15 м,  $S$  – до 0,02 м и внешняя зона –  $L$  до 0,17 м,  $S$  до 0,06 м (рис. 3б и 3д). По аналогии с первым экспериментом выделены три характерных диапазона скорости капель в потоке: от 0 до 8 м/с, от 8 до 34 м/с и от 34-40,41 м/с. На рис. 3в и 3е представлено качественное распределение капель суспензионного топлива в процессе пневмомеханического распыла. Установлено, что капли, обладающие максимальными скоростями от 34-40,41 м/с (диапазон скорости 3), распределены по всей области исследования (цветовая гамма распределения скоростей по аналогии с первым экспериментом). При этом их количество изменяется от 208 до 246, что составляет не более 0,2% от общего числа зафиксированных частиц. Для второго диапазона характерны капли, скорости которых изменяются от 8 до 34 м/с в количестве близком к 21 000 (20% от общего числа зафиксированных частиц). Наибольшее количество (до 85 200, почти 80% от общего числа зафиксированных частиц) капель распыляемого суспензионного топлива обладают скоростями до 8 м/с.

На рис. 4 представлены результаты экспериментальных исследований структуры потока суспензионного топлива в процессе пневмомеханического распыла (**третий эксперимент**), характерные для стабильного факела. Время распыла суспензионного топлива при соотношении давлений 0,4 МПа/0,38 МПа составило 120 °С. Протяженность области исследования по оси факела составляла 0,17 м. Уже через 20-25° С момента начала

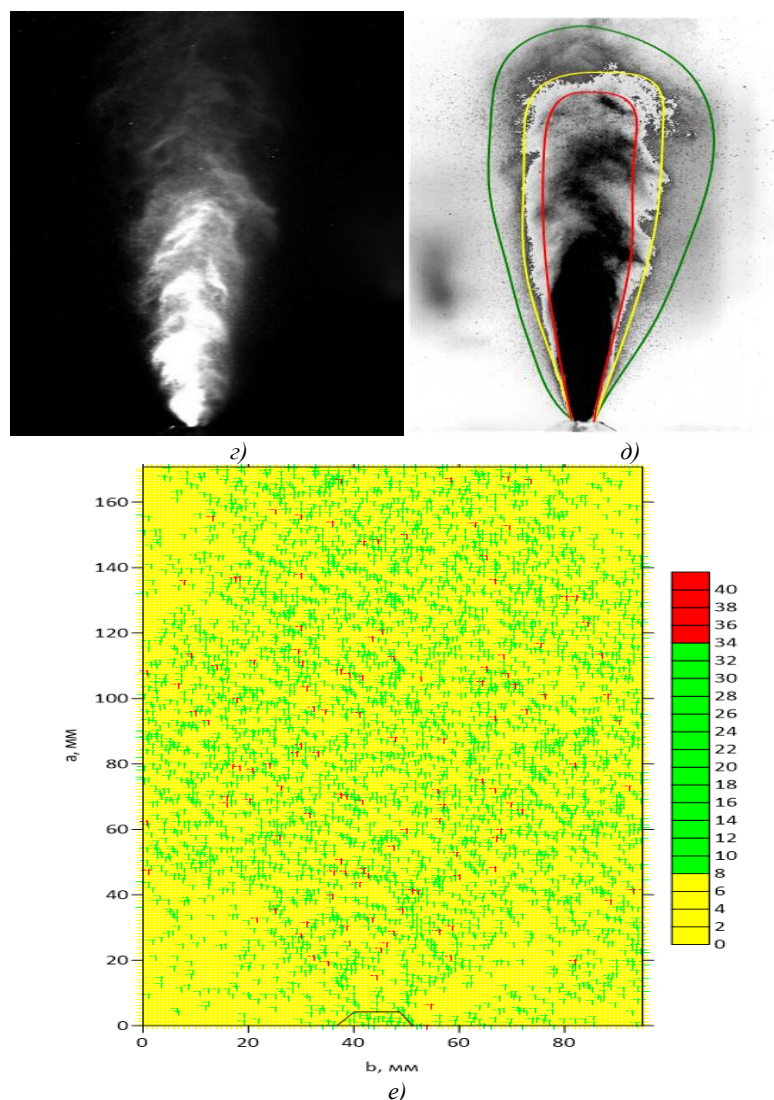


эксперимента структура и параметры факела изменялись незначительно (стабильный факел).



Наименование	Минимум, м/с	Максимум, м/с	%	Количество капель, шт.
Диапазон скорости 1	0	8	80,2	81690
Диапазон скорости 2	8	34	19,6	19939
Диапазон скорости 3	34	40,41	0,2	235

Установлено, что в процессе пневмомеханического распыла формируется факел с ярко выраженными зонами: сердцевинной потока –  $L$  до 0,15 м,  $S$  до 0,02 м; средняя зона –  $L$  0,16 м,  $S$  до 0,02 м и внешняя зона –  $L$  до 0,17 м,  $S$  до 0,065 м (рис. 4б и 4д). По аналогии с первым экспериментом выделены три характерных диапазона скорости капель в потоке: от 0 до 8 м/с, от 8 до 34 м/с и от 34-40,41 м/с. На рис. 4в и 4е представлено качественное распределение капель суспензионного топлива в процессе пневмомеханического распыла. Установлено, что капли, обладающие максимальными скоростями от 34-40,41 м/с (диапазон скорости 3), распределены по всей области исследования (цветовая гамма распределения скоростей по аналогии с первым экспериментом). При этом их количество составляет 235, что составляет не более 0,2% от общего числа зафиксированных частиц. Для второго диапазона характерны капли, скорости которых изменяются от 8 до 34 м/с в количестве близком к 20 000 (19,5% от общего числа зафиксированных частиц). Наибольшее количество (до 82 500, почти 81% от общего числа зафиксированных частиц) капель распыляемого суспензионного топлива обладают скоростями до 8 м/с.



Наименование	Минимум, м/с	Максимум, м/с	%	Количество капель, шт.
Диапазон скорости 1	0	8	80,8	82258
Диапазон скорости 2	8	34	19,0	19370
Диапазон скорости 3	34	40,41	0,2	236

Рис. 4. Структура потока и параметры при давлениях суспензионного топлива и воздуха 0,4 МПа/0,38 МПа

Результаты экспериментальных исследований структуры потока распыляемого суспензионного топлива в составе с пластификатором - лигносульфонатом позволяют сделать следующие выводы:

- с увеличением давлений суспензионного топлива и воздуха изменяется период времени установления стабильного факела с 10 до 25 °С;

- геометрические параметры характерных зон факела увеличивается с ростом давлений;

- наибольшее количество капель обладают скоростями до 8 м/с, при этом следует учитывать, что в процессе регистрации потока фиксируются частицы, размеры которых составляют менее 1 мкм, образуются такие капли в результате дробления более крупных, и являются аэрозолями;

- доля капель, обладающих скоростями 32 м/с и более не превышает 1% от общего количества;

- значительное количество капель обладают скоростями от 8 до 32 м/с, что составляет большую часть факела.

Размеры капель суспензионного топлива в процессе пневмомеханического распыла не превышают 500 мкм. Полученные результаты позволяют выделить две категории капель:

от 0 до 300 мкм и от 300 до 500 мкм. При этом значения скоростей в потоке изменяются от 0 до 17 м/с и от 17 до 40 м/с. На рис. 5 представлена зависимость изменения критерия  $We$  от скорости капель. Значения размеров капель принимались как среднее для трех экспериментов, т.к. при различных давлениях отличаются незначительно.

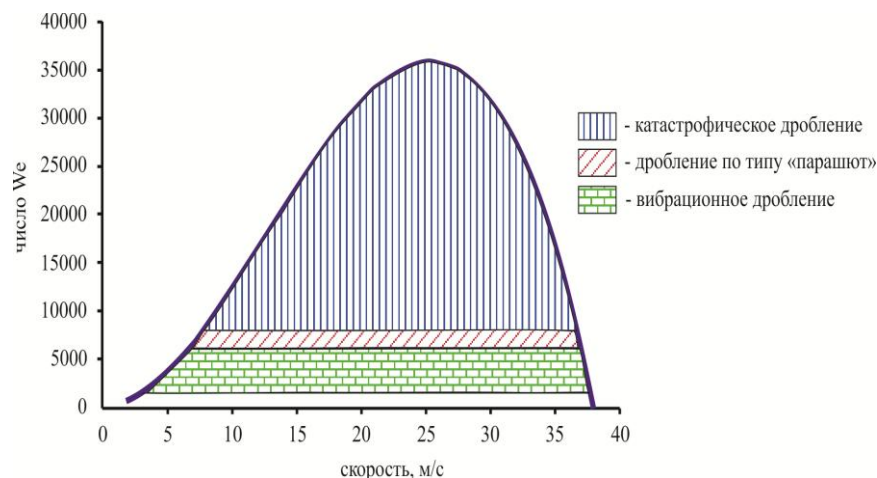


Рис. 5. Зависимость числа  $We$  от скорости капель

Зависимость изменения числа  $We$  от скорости капель различных размеров позволяет выделить максимальные (критические) значения критерия  $We$  в области исследуемой задачи и характеризовать некоторые стадии дробления капель суспензионного топлива. Согласно проведенным ранее исследованиям [33] для распыляемых суспензионных топлив характерны три стадии дробления капель: вибрационное, по типу «парашют» и катастрофическое. Каждому типу присвоен свой диапазон значений критерия  $We$ . Таким образом, можно сделать вывод о том, что при проведении эксперимента значительная 13,4% капель распыляемого суспензионного топлива разрушаются по принципу вибрационного дробления, критерий  $We$  изменяется в диапазоне от 1500 до 6300. Дроблению капель по типу «парашют» подвержены 4,2%, значения критерия  $We$  от 6300 до 7800. Значительная часть капель – 78,2% претерпевает катастрофическое дробление ( $We=7800$  и более). В диапазоне изменения  $We$  от 0 до 1500 разрушение капель не происходит.

### Заключение

Проведены экспериментальные исследования структуры потока распыляемого суспензионного топлива в составе с пластификатором – лигносульфонатом в зависимости от давления, впервые выполнен анализ распределения капель по скоростям, их количеству и размеру. Установлено, что рост давления является причиной увеличения периода времени установления стабильного факела. При этом геометрические параметры характерных зон факела увеличивается. Анализ распределения капель по скоростям позволяет сделать несколько выводов: наибольшее количество частиц обладают скоростями до 8 м/с; доля капель, обладающих скоростями 32 м/с и более не превышает 1% от общего количества; значительное число капель обладают скоростями от 8 до 32 м/с. Определены две категории размера капель: от 0 до 300 мкм и от 300 до 500 мкм. Значения критерия  $We$  с учетом скорости и размера капель иллюстрирует картину преобладания катастрофического дробления капель в процессе распыла. Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы при математическом и физическом моделировании процесса распыла суспензионных топлив в топках энергетических котлов, что позволит делать прогностические оценки аэродинамических характеристик проектируемых и действующих агрегатов.

### Литература

1. Овчинников Ю.В., Бойко Е.Е., Серант Ф.А. Проблемы сжигания водоугольных топлив и предложения по разработке технологии сжигания // Доклады академии наук высшей школы российской федерации. 2015. №1 (26). С. 85-93.
2. Status of DOE's Clean Coal Program. Available at: URL: <https://www.energy.gov/fe/articles/status-does-clean-coal-program>. Accessed to: 19 Feb 2019.
3. Делягин Г.Н. Экологически чистое топливо ЭКОВУТ – путь резкого улучшения экологической ситуации в энергетике России // Материалы международной научно-практической конференции «Экология энергетики 2000». 2000. С. 320-323.

4. Саломатов В.В. Состояние и перспективы угольной и ядерной энергетик России // Теплофизика и аэромеханика. 2009. №16 (4). С. 531-544.
5. Clean Coal Technology Demonstration Program. Available at: URL: <https://www.energy.gov/fe/downloads/clean-coal-technology-demonstration-program>. Accessed to: 19 Feb 2019.
6. Kurgankina M.A., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Advantages of switching coal-burning power plants to coal-water slurries containing petrochemicals // Applied Thermal Engineering. 2019. pp. 998-1008.
7. Murko V., Hamalainen V. The Development of Environmentally Friendly Technologies of Using Coals and Products of Their Enrichment in the Form of Coal Water Slurries // E3S Web of Conferences. 2017. V. 21.
8. Lefebvre A.H. Airblast atomization // Progress in Energy and Combustion Science. 1980. V. 6. pp. 233-261.
9. Lefebvre A.H., McDonell V.G. Atomization and Sprays. 2<sup>nd</sup> edition. Boca Raton: CRC Press. 2017.
10. Urbán A., Malý M., Józsa V., et al. Effect of liquid preheating on high-velocity airblast atomization: From water to crude rapeseed oil // Experimental Thermal and Fluid Science. 2019. pp. 137-151.
11. Esteban B., Riba J.-R., Baquero G., et al. Temperature dependence of density and viscosity of vegetable oils // Biomass & Bioenergy. 2012. V. 42. pp. 164-171.
12. Wang X.F., Lefebvre A.H. Influence of fuel temperature on atomization performance of pressure-swirl atomizers // Journal of Propulsion and Power. 1988. V. 4. P. 222-227.
13. Shah P.R., Ganesh A. Study the influence of pre-heating on atomization of straight vegetable oil through Ohnesorge number and Sauter mean diameter // Journal of the Energy Institute. 2017.
14. Hanna R., Zoughaib A. Atomization of high viscosity liquids through hydraulic atomizers designed for water atomization // Experimental Thermal and Fluid Science. 2017. V.85. pp. 140-153.
15. Park S.H., Kim H.J., Suh H.K., Lee C.S. Experimental and numerical analysis of spray-atomization characteristics of biodiesel fuel in various fuel and ambient temperatures conditions // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2009. V.30. pp. 960-970.
16. Al-Shudeifat M.A., Donaldson A.B. Combustion of waste trap grease oil in gas turbine generator // Fuel. 2010. V. 89. pp. 549-553.
17. Seljak T., Oprešnik S.R., Kunaver M., et al. Effects of primary air temperature on emissions of a gas turbine fired by liquefied spruce wood // Biomass & Bioenergy. 2014. V.71. pp. 394-407.
18. Seljak T., Katrašnik T. Designing the microturbine engine for waste-derived fuels // Waste Management. 2016. V. 47. pp. 299-310.
19. Zenkov A., Larionov K., Yankovsky S., et al. Research of rheological properties improvement methods of coal-water fuel based on low-grade coal // MATEC Web of Conferences. 2017. V. 141.
20. Kijo-Kleczkowska A. Combustion of coal-water suspensions // Fuel. 2011. V.90. pp. 865-877.
21. Saito M., Sadakata M., Sakai T. Single droplet combustion of coal-oil/methanol/water mixtures // Fuel. 1983. V.63. pp. 1481-1486.
22. Borodulya V.A., Buchilko E.K., Vinogradov L.M. Some special features of combusting the coal-water fuel made of Belarussian brown coals in the fluidized bed // Thermal Engineering. 2014. V.61. pp. 497-502.
23. Robak J., Ignasiak K., Rejdak M. Evaluation of the effects of coal grinding in terms of coal water slurry preparation // E3S Web of Conference. 2016. V.8.
24. Glushkov D.O., Lyrshchikov S.Y., Shevyrev S.A., et al. Burning properties of slurry based on coal and oil processing waste // Energy & Fuels. 2016. V.30. pp. 3441-3450.
25. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Simultaneous ignition of several droplets of coal-water slurry containing petrochemicals in oxidizer flow // Fuel Processing Technology. 2016. V.152. pp. 22-33.
26. Glushkov D.O., Syrodoy S.V., Zhakharevich A.V., et al. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: analysis of key aspects // Fuel Processing Technology. 2016. V.148. pp. 224-235.
27. Larionov K.B., Zenkov A.V., Yankovsky S.A., et al. Change of coal-water fuel rheological properties by rotary flows modulation // Proceedings – 2016 11th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2016. 2017. pp. 568-571.
28. Moriyama R., Takeda S., Onozaki M., et al. Upgrading of lowrank coal as coal water slurry and its utilization // International Journal of Coal Preparation and Utilization. 2005. V.25. pp. 193-210.
29. Egorov R.I., Zaitsev A.S., Salgansky E.A. Activation of the fuels with low reactivity using the high-power laser pulses // Energies. 2018. V.11(11).
30. Hsu T. C., Yang S.I. Viscosity Effects of Spray Characteristics in Air-Blast Atomizer // Key Engineering Materials. 2015. V.656-657. pp. 142-147.
31. Yeh Y.H., Hsu T.C., Yang S.I. High viscosity fluid spray characteristics in the twin-fluid atomizer // ASPACC 2015 - 10th Asia-Pacific Conference on Combustion. 2015. 116004.

32. Галустов В.С. Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике. М.: Энергоатомиздат, 1989. 240 с.

33. Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Губин В.Е., и др. К вопросу об исследовании структуры потока водоугольного топлива в процессе его пневмомеханического распыла // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. 2018. №18 (4). С. 5-13.

#### Авторы публикации

**Гвоздяков Дмитрий Васильевич** – доцент НОЦ И.Н. Бутакова, Томский политехнический университет. Email: dim2003@tpu.ru.

**Зенков Андрей Викторович** – ассистент НОЦ И.Н. Бутакова, Томский политехнический университет. Email: avz41@tpu.ru.

**Губин Владимир Евгеньевич** – доцент НОЦ И.Н. Бутакова, Томский политехнический университет. Email: gubin@tpu.ru.

**Ведяшкин Максим Викторович** – доцент Отделения контроля и диагностики, Томский политехнический университет. Email: vedyashkin@tpu.ru.

#### References

1. Ovchinnikov YuV, Boyko EE, Serant FA. Problems of combustion of coal-water fuels and proposals for the development of combustion technology. *Reports of the Academy of Sciences of Higher School of the Russian Federation*. 2015;1 (26):85-93. Available at: <https://doi.org/10.17212/1727-2769-2015-1-85-93>.
2. Status of DOE's Clean Coal Program. Available at: URL: <https://www.energy.gov/fe/articles/status-does-clean-coal-program>. Accessed to: 19 Feb 2019.
3. Delyagin GN. Ecological clean fuel ECOWET - the way of a sharp improvement of the ecological situation in the power industry of Russia. *Materials of the international scientific-practical conference "Ecology of power engineering 2000"*. 2000. pp. 320-323.
4. Salomatov VV. The state and prospects of coal and nuclear power engineering in Russia. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2009;16(4):531-544.
5. Clean Coal Technology Demonstration Program. Available at: URL: <https://www.energy.gov/fe/downloads/clean-coal-technology-demonstration-program>. Accessed to: 19 Feb 2019.
6. Kurgankina MA, Nyashina GS, Strizhak PA. Advantages of switching coal-burning power plants to coal-water slurries containing petrochemicals. *Applied Thermal Engineering*. 2019. pp. 998-1008.
7. Murko V, Hamalainen V. *The Development of Environmentally Friendly Technologies of Using Coals and Products of Their Enrichment in the Form of Coal Water Slurries*. E3S Web of Conferences. 2017. V. 21.
8. Lefebvre AH. Airblast atomization. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1980. V. 6. pp. 233-261.
9. Lefebvre AH, McDonell VG. *Atomization and Sprays*. 2<sup>nd</sup> edition. Boca Raton: CRC Press, 2017.
10. Urbán A, Malý M, Józsa V, Jedelský J. Effect of liquid preheating on high-velocity airblast atomization: From water to crude rapeseed oil. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2019. pp. 137-151.
11. Esteban B, Riba J.-R, Baquero G, Rius A., et al. Temperature dependences of density and viscosity of vegetable oils. *Biomass & Bioenergy*. 2012;42:164-171.
12. Wang XF, Lefebvre AH. Influence of fuel temperature on atomization performance of pressure-swirl atomizers. *Journal of Propulsion and Power*. 1988;4:222-227.
13. Shah PR, Ganesh A. Study the influence of pre-heating on atomization of straight vegetable oil through Ohnesorge number and Sauter mean diameter. *Journal of the Energy Institute*. 2017.
14. Hanna R, Zoughaib A. Atomization of high viscosity liquids through hydraulic atomizers designed for water atomization. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2017;85:140-153.
15. Park SH, Kim HJ, Suh HK, et al. Experimental and numerical analysis of spray-atomization characteristics of biodiesel fuel in various fuel and ambient temperatures conditions. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2009;30:960-970.
16. Al-Shudeifat MA, Donaldson AB. *Combustion of waste trap grease oil in gas turbine generator*. Fuel. 2010;89:549-553.



17. Seljak T, Oprešnik SR, Kunaver M, et al. Effects of primary air temperature on emissions of a gas turbine fired by liquefied spruce wood. *Biomass & Bioenergy*. 2014;71:394-407.
18. Seljak T, Katrašnik T. Designing the microturbine engine for waste-derived fuels. *Waste Management*. 2016. V. 47. pp. 299-310.
19. Zenkov A, Larionov K, Yankovsky S, et al. *Research of rheological properties improvement methods of coal-water fuel based on low-grade coal*. MATEC Web of Conferences. 2017. V.141.
20. Kijo-Kleczkowska A. Combustion of coal-water suspensions. *Fuel*. 2011;90:865-877.
21. Saito M, Sadakata M, Sakai T. *Single droplet combustion of coal-oil/methanol/water mixtures*. *Fuel*. 1983; 63:1481-1486.
22. Borodulya VA, Buchilko EK, Vinogradov LM. Some special features of combusting the coal-water fuel made of Belarussian brown coals in the fluidized bed. *Thermal Engineering*. 2014;61:497-502.
23. Robak J, Ignasiak K, Rejdak M. *Evaluation of the effects of coal grinding in terms of coal water slurry preparation* // E3S Web of Conference. 2016.
24. Glushkov DO, Lyrshchikov SY, Shevyrev SA, et al. Burning properties of slurry based on coal and oil processing waste. *Energy&Fuels*. 2016;30:3441-3450.
25. Glushkov DO, Kuznetsov GV, Strizhak PA. Simultaneous ignition of several droplets of coal-water slurry containing petrochemicals in oxidizer flow. *Fuel Processing Technology*. 2016;152:22-33.
26. Glushkov DO, Syrodoy SV, Zhakharevich AV, et al. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: analysis of key aspects. *Fuel Processing Technology*. 2016;148:224-235.
27. Larionov KB, Zenkov AV, Yankovsky SA, et al. *Change of coal-water fuel rheological properties by rotary flows modulation*. Proceedings - 2016 11th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2016;568-571.
28. Moriyama R, Takeda S, Onozaki M, et al. Upgrading of lowrank coal as coal water slurry and its utilization. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2005;25:193-210.
29. Egorov RI, Zaitsev AS, Salgansky EA. Activation of the fuels with low reactivity using the high-power laser pulses. *Energies*. 2018;11(11).
30. Hsu TC, Yang SI. Viscosity Effects of Spray Characteristics in Air-Blast Atomizer. *Key Engineering Materials*. 2015;656:142-147.
31. Yeh YH, Hsu TC, Yang SI. *High viscosity fluid spray characteristics in the twin-fluid atomizer*. ASPACC 2015 - 10th Asia-Pacific Conference on Combustion. 2015.
32. Galustov VS. *Direct-flow spray devices in power system*. M: Energoatomizdat, 1989. 240 p.
33. Gvozdyakov DV, Zenkov AV, Gubin VE, et al. On the study of coal-water fuel flow structure during its pneumatic-mechanical atomization. *Bulletin of the South Ural State University. Energy series*. 2018;18(4):5-13.

#### Authors of the publication

**Dmitry V Gvozdyakov** – National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia. Email: dim2003@tpu.ru.

**Andrey V Zenkov** – National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia. Email: avz41@tpu.ru.

**Vladimir E Gubin** – National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia. Email: gubin@tpu.ru.

**Maxim V Vedyashkin** – National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia. Email: vedyashkin@tpu.ru.

Поступила в редакцию

20 февраля 2019 г.