



Научная статья

УДК 662.62:662.75:662.94.069

<https://elibrary.ru/xkcizp><https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-297-309>

Влияние кавитационной обработки на свойства водоугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости и характеристики их распыления пневматической форсункой

Д.В. Гвоздяков^{1✉}, А.В. Зенков², Л.И. Мальцев³, Ю.С. Поджаров⁴

^{1,2}Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

^{3,4}Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Резюме. Цель – проведение экспериментальных исследований, направленных на изучение реологических свойств и характеристик распыления пневматической форсункой водоугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости. Объектом исследования являлась водоугольная суспензия, приготовленная на основе длиннопламенного угля с помощью роторного гидродинамического генератора кавитаций. Динамическая вязкость водоугольных суспензий исследовалась при помощи ротационного вискозиметра Реотест-2. Размер капель распыленных суспензий определялся при помощи метода Interferometric Particle Imaging. При проведении экспериментов использовалась пневматическая форсунка, предназначенная для распыления водоугольных топлив. Значение теплотворной способности составов водоугольных суспензий оценивалось теоретическим методом при помощи уравнения Д.И. Менделеева для расчета низшей теплоты сгорания органических веществ с определенным элементным составом. Установлено, что после кавитационной обработки двухкомпонентного водоугольного топлива в течение 90 с значение вязкости снижается на 48%. Показано, что в случае замещения воды аналогичным по массе (от 5 до 20%) количеством пирогенетической жидкости вязкость водоугольного топлива увеличивается. Кавитационная обработка данных суспензий способствует снижению вязкости таких трехкомпонентных водоугольных топлив на 27–45%. Исследования статической седиментации показали, что после кавитационной обработки водоугольных суспензий осаждение частиц угля начинается после 24 часов. Установлено, что обработка суспензий в течение 27 и 90 с в роторном гидродинамическом генераторе кавитаций способствует снижению среднего размера капель в струе после распыления пневматической форсункой на 5,5% и 6,5%, соответственно. Введение в состав водоугольного топлива пирогенетической жидкости приводит к росту теплотворной способности топлива на 6,9%. Таким образом, использование пирогенетической жидкости в составе водоугольного топлива и его обработка в роторном гидродинамическом генераторе кавитаций позволяют решить проблему низкой реакционной способности водоугольных суспензий.

Ключевые слова: водоугольная суспензия, пирогенетическая жидкость, генератор кавитаций, вязкость, распыление, пневматическая форсунка

Финансирование: Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-00124).

Для цитирования: Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Мальцев Л.И., Поджаров Ю.С. Влияние кавитационной обработки на свойства водоугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости и характеристики их распыления пневматической форсункой // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 297–309. EDN: XKCIZP, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-297-309>.

Influence of cavitation treatment on the properties of coal-water slurries with pyrogenetic liquid and characteristics of their atomization by a pneumatic nozzle

Dmitry V. Gvozdyakov^{1✉}, Andrey V. Zenkov², Leonid I. Maltsev³, Yuri S. Podzharov⁴

^{1,2}National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

^{3,4}Federal State Budgetary Institution of Science named after S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Abstract. Experimental studies were conducted to investigate the rheological properties and atomization characteristics of coal-water slurries sprayed by a pneumatic nozzle with addition of pyrogenetic liquid. The research object was coal-water slurries prepared on the basis of long-flame coal using a rotary hydrodynamic cavitation generator. The dynamic viscosity of samples was investigated using a Reotest-2 rotary viscometer. The droplet size of atomized slurries was determined by the interferometric particle imaging method. A pneumatic nozzle designed for spraying of coal-water slurry fuels was used. The calorific value of coal-water slurry compositions was estimated by a theoretical method using Mendelev's equation for calculating the lower heating value of combustion of organic substances with a certain elemental composition. It was found that cavitation treatment of a two-component coal-water fuel for 90 s leads to a 48% decrease in its viscosity. It was shown that substitution of water with a similar amount of pyrogenic liquid (5 to 20%) leads to an increase in the viscosity of coal-water fuels. The cavitation treatment of such slurries reduces the viscosity of the respective three-component coal-water fuels by 27–45%. According to the results of static sedimentation studies, coal particles start to precipitate 24 h after the onset of cavitation treatment. The treatment of the slurries under consideration for 27 and 90 s in a rotary hydrodynamic cavitation generator was established to reduce the average droplet size in the jet after spraying with a pneumatic nozzle by 5.5% and 6.5%, respectively. The introduction of pyrogenetic liquid into the composition of coal-water fuels increases their calorific value by 6.9%. It can be concluded that the use of pyrogenetic liquid in the composition of coal-water slurry fuels followed by their treatment in a rotary hydrodynamic cavitation generator can solve the problem of low reactivity of coal-water slurries.

Keywords: coal-water slurry, pyrogenetic liquid, cavitation generator, viscosity, spraying, pneumatic atomizer

Funding: The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 22-79-00124).

For citation: Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Maltsev L.I., Podzharov Yu.S. Influence of cavitation treatment on the properties of coal-water slurries with pyrogenetic liquid and characteristics of their atomization by a pneumatic nozzle. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):297-309. (In Russ.). EDN: XKCIZP, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-297-309>.

ВВЕДЕНИЕ

Переход к экологически чистым энергетическим технологиям, обусловленный современными требованиями к охране окружающей среды, предполагает поиск и создание новых источников энергии, в том числе и топлив [1]. Одним из способов удовлетворить эти требования и сохранить на прежнем уровне показатели по выработке энергии тепловыми электростанциями является переход на многокомпонентные топлива [2]. В связи с этим изучение свойств и характеристик таких топлив во многих странах является актуальным [3]. Наиболее перспективными и доступными котельными топливами с точки зрения энергетики, экологии и экономики являются водоугольные суспензии (ВУС) [4]. Например, их использование в промышленной энергетике

позволяет снизить на 16–20% выбросы в атмосферу оксидов азота и серы [5, 6]. Именно наличие воды в составе таких топлив делает их конкурентоспособными по нескольким критериям. Первый, как отмечалось выше, – экологичность. Второй – пожаробезопасность. Третий – возможность изменять калорийность за счет введения в их состав горючих добавок в относительно небольших количествах. Последний критерий и позволяет считать ВУС многокомпонентным топливом. В качестве третьих компонентов водоугольных суспензий могут использоваться отходы различного происхождения [7], например, производственные. Их сжигание в составе ВУС позволяет решить проблему безопасной утилизации.

Одними из перспективных компонентов ВУС являются легкие продукты пиролиза

древесины – пирогенетическая жидкость (ПЖ). Количество такой жидкости составляет более 25–35 масс.% от получаемого продукта (например, древесный уголь), а ее свойства и характеристики зависят от технических условий процесса пиролиза. Прямая утилизация (сброс в систему канализации, отвод в почву или на открытый грунт) такой жидкости невозможна. Связано это с содержанием в ней различных химических соединений, количество которых зависит от условий процесса пиролиза. При этом пирогенетическая жидкость обладает энергетической ценностью (содержит остаточные углеводороды пиролизного масла) и может быть эффективно использована в качестве компонента водоугольных топлив. Введение в состав водоугольных топлив пирогенетической жидкости позволит решить проблему ее безопасной утилизации. Объясняется это тем, что в условиях высокотемпературного сжигания количество вредных компонентов снижается в результате осаждения, а объемы их выбросов в атмосферу становятся минимальными.

В настоящее время остается много нерешенных проблем, связанных с использованием пирогенетической жидкости в качестве компонента ВУС. Например, отсутствуют данные о допустимых значениях концентрации (С) пирогенетической жидкости в составе топлива в зависимости от марки угля; остаются неизвестными свойства и характеристики таких суспензий. Последние, как известно [8, 9], определяют эффективность процессов распыления и сжигания ВУС. Установление таких закономерностей позволит обеспечить необходимые условия для эффективного и безопасного сжигания ВУС в камерах сгорания энергетических котлов. Такая информация поможет в дальнейшем проектировщикам и конструкторам создавать энергетическое оборудование, обеспечивающее эффективное сжигание многокомпонентных топлив. Проведение экспериментальных и теоретических исследований свойств и характеристик водоугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости позволит получить основные закономерности ее влияния на реологические свойства и энергетические характеристики топлива.

В силу того, что ПЖ является достаточно сложной жидкостью, свойства и характеристики ВУС с добавками ПЖ (вязкость, плотность, параметры распыления, зажигания и горения) существенно зависят от ее компонентного состава [10, 11]. При этом введение в состав водоугольного топлива жидкого горючего компонента может изменить теплотворную способность топлива. Кроме того, исследования влияния пирогенетической жидкости на свойства и характеристики ВУС позволят установить действительное влияние такого производственного отхода на исследуемые параметры в сравнении с двухкомпонентным водоугольным топливом, что позволит существенно расширить информационную базу научно-технической информации о перспективных экологических водоугольных суспензиях. Поэтому целью работы является проведение экспериментальных исследований, направленных на изучение свойств и характеристик распыления пневматической форсункой водоугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

При подготовке образцов водоугольных суспензий использовались следующие: измельченный до фракции менее 120 мкм длиннопламенный уголь, водопроводная вода из системы водоснабжения и пирогенетическая жидкость. Основные характеристики компонентов ВУС представлены ниже.

Уголь: зольность – 11,5%; выход летучих – 40,5%; содержание углерода – 56,4%; содержание водорода – 4%; суммарная доля кислорода, азота и серы – 15,8%; влажность – 11,5%, низшая теплота сгорания – 21,9 МДж/кг.

Водопроводная вода: плотность – 997,0 кг/м³; pH – 6,8.

Как отмечалось выше, свойства и компонентный состав пирогенетической жидкости могут отличаться от условий технологического процесса пиролиза, поэтому при проведении исследований использовались усредненные значения параметров: плотность – 1044,0 кг/м³, pH – 2,3, низшая теплота сгорания (Q) – 2,8 МДж/кг. Химический состав ПЖ представлен на рис. 1.

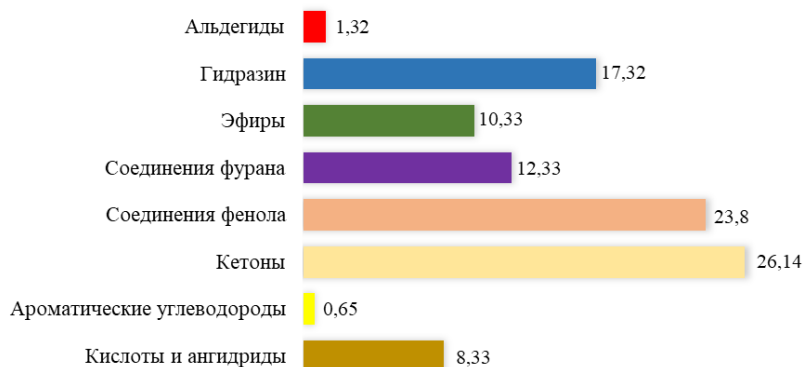


Рис. 1. Усредненные значения основных компонент пирогенетической жидкости, %
 Fig. 1. Averaged values of the main components of the pyrogenetic fluid, %

При проведении экспериментальных исследований использовалось несколько составов ВУС. Содержание угля в каждом топливе оставалось неизменным. Отличительной особенностью являлось то, что вода в составе ВУС замещалась аналогичным по массе количеством пирогенетической жидкости. Компонентные составы суспензий представлены в табл. 1.

Таблица 1. Водоугольные суспензии
 Table 1. Coal-water slurries

ВУС количество ПЖ	Уголь	Вода	Пирогенетическая жидкость
	% по массе		
ВУС ₀	50	50	0
ВУС ₅		45	5
ВУС ₁₀		40	10
ВУС ₁₅		35	15
ВУС ₂₀		30	20

Примечания: ВУС – водоугольные суспензии;
 ПЖ – пирогенетическая жидкость.

Кавитационная обработка водоугольных суспензий осуществлялась на роторном гидродинамическом генераторе кавитации (РГДГК), разработанном в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. Эффективность данного способа обусловлена тем, что при кавитационном воздействии на водоугольное топливо частицы угля подвергаются дополнительному разрушению. Возникает это явление после схлопывания паровых микропузырьков, возникающих возле частиц угля. Кавитационная обработка ВУС способ-

ствует увеличению пористости частиц угля, что вносит дополнительный положительный эффект при сжигании водоугольного топлива [13]. Данный способ обработки ВУС в составе с ПЖ способствует также гомогенизации пирогенетической жидкости. В исходном состоянии эта жидкость является существенно неоднородной из-за наличия в ней крупных нерастворенных фрагментов пиролизного масла. При этом получаемая суспензия обладает высокой стабильностью. На рис. 2 представлен роторный гидродинамический генератор кавитаций и время обработки (τ) ВУС (табл. 1).

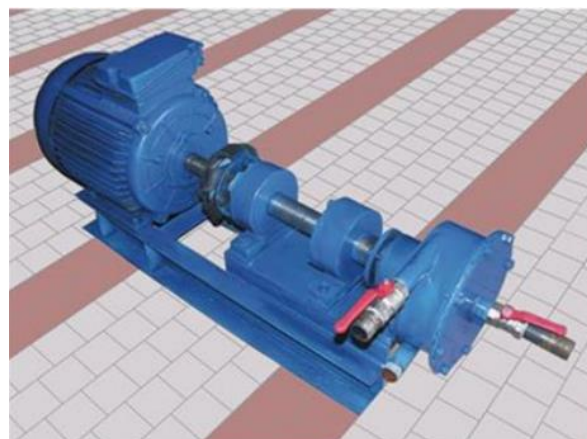


Рис. 2. Роторный гидродинамический генератор кавитации
 Fig. 2. Rotary hydrodynamic cavitation generator

Исследуемые составы ВУС время обработки, количество ПЖ :
 1) ВУС₀²⁷; 2) ВУС₀⁹⁰; 3) ВУС₅²⁷; 4) ВУС₅⁹⁰;
 5) ВУС₁₀²⁷; 6) ВУС₁₀⁹⁰; 7) ВУС₁₅²⁷; 8) ВУС₁₅⁹⁰;
 9) ВУС₂₀²⁷; 10) ВУС₂₀⁹⁰.

Таким образом, при проведении исследований использовалось десять составов ВУС, отличающихся между собой компонентным составом и временем обработки в роторном гидродинамическом генераторе кavitаций.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Вязкость топлив, в том числе и водугольных суспензий, является очень важным параметром, определяющим качественные и количественные характеристики газокapельного потока (например, средний размер ка-

пель) после распыления [14–16]. Также жидкости, обладающие малыми значениями вязкости, лучше подвержены диспергированию в среде воздуха (или окислителя в условиях высоких температур камер) [17]. Динамическая вязкость ВУС (см. табл. 1 и рис. 2) исследовалась при помощи ротационного вискозиметра Реотест-2. На рис. 3 и 4 представлены зависимости изменения динамической вязкости ВУС в зависимости от компонентного состава суспензии и времени обработки в РГДГК.

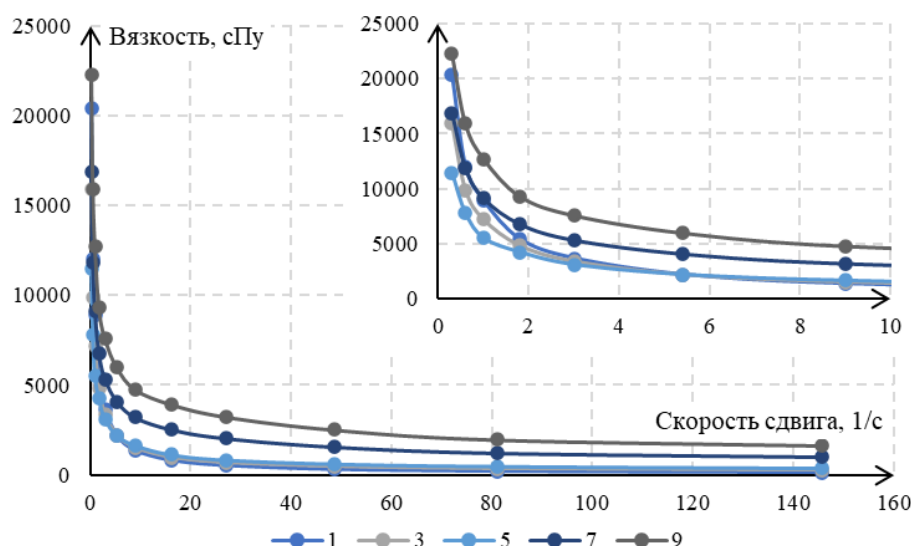


Рис. 3. Динамическая вязкость суспензий после 27 с в роторном гидродинамическом генераторе кavitаций
Fig. 3. Dynamic viscosity of slurries after 27s treatment in a rotary hydrodynamic cavitation generator

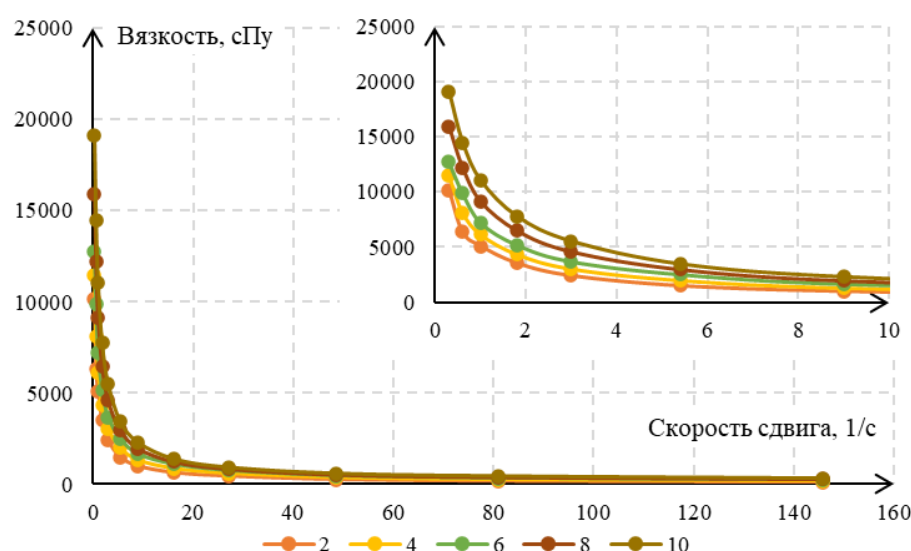


Рис. 4. Динамическая вязкость суспензий после 90 с в роторном гидродинамическом генераторе кavitаций
Fig. 4. Dynamic viscosity of slurries after 90s treatment in a rotary hydrodynamic cavitation generator

Результаты экспериментальных исследований динамической вязкости ВУС с добавками ПЖ в зависимости от времени обработки в роторном гидродинамическом генераторе кавитаций показали, что продолжительность кавитационного воздействия на водоугольные суспензии (см. табл. 1, рис. 2) оказывает влияние на значение динамической вязкости ВУС. Установлено, что в исследованном диапазоне изменения времени кавитационной обработки ВУС от 27 до 90 с динамическая вязкость суспензий снижается:

- для ВУС₀ на 48%;
- для ВУС₅ на 27%;
- для ВУС₁₀ на 30%;
- для ВУС₁₅ на 33%;
- для ВУС₂₀ на 45%.

Существенное (на 48%) снижение вязкости двухкомпонентного водоугольного топлива объясняется тем, что при обработке ВУС в РГДГК кавитационный эффект приводит к дополнительному дроблению частиц угля и гомогенизации суспензии. В результате чего такая суспензия получается гомогенизированной. Замещение в составе ВУС воды аналогичным по массе количеством пирогенетической жидкости приводит к увеличению вязкости суспензии. При этом кавитационная обработка таких суспензий также способствует снижению вязкости. В сравнении с двухкомпонентным ВУС эффект менее значительный. Изменение составляет 27–45% в результате того, что, во-первых, вязкость ПЖ выше, чем вязкость воды; во-вторых, наличие в составе ПЖ фрагментов пиролизного масла способствует увеличению вязкости ВУС даже после кавитационной обработки суспензии.

Седиментационная устойчивость изучаемых суспензий оценивалась методом измерения объема отделившейся жидкой фазы ВУС в прозрачном сосуде со шкалой. Необходимость исследовать данный параметр вызвана тем, что для водоугольных суспензий характерно отделение взвеси в состоянии статики. На рис. 5 представлена иллюстрация результатов расслоения трех составов ВУС за 3 ч после наполнения емкостей.

В табл. 2 представлены результаты для всех топлив. Исходный объем ВУС составлял

100 мл. Исследования выполнены для трех временных диапазонов:

- расслоение топлива через 3 ч статической выдержки;
- расслоение топлива через 24 ч статической выдержки;
- расслоение топлива через 72 ч статической выдержки.

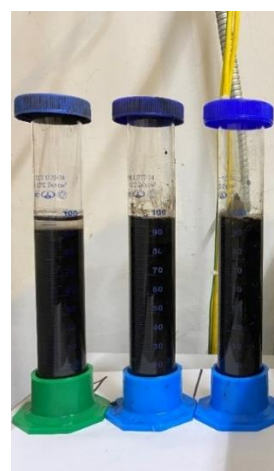


Рис. 5. Стабильность образцов водоугольных суспензий через 3 ч: 1 – ВУС₂₀; 2 – ВУС₂₀²⁷; 3 – ВУС₂₀⁹⁰
Fig. 5. Stability of coal-water slurry (CWS) samples in 3 hours: 1 – CWS₂₀; CWS₂₀²⁷; 3 – CWS₂₀⁹⁰

Таблица 2. Расслоение водоугольных суспензий
Table 2. Coal-water slurry stratification

Состав ВУС/Время выдержки ВУС	Расслоение ВУС, мл		
	3 ч	24 ч	72 ч
ВУС ₀	12	14	18
ВУС ₀ ²⁷	0	2	3
ВУС ₀ ⁹⁰	0	2	3
ВУС ₅	11	12	17
ВУС ₅ ²⁷	0	0	1
ВУС ₁₀	9	11	13
ВУС ₁₀ ²⁷	0	0	1
ВУС ₁₀ ⁹⁰	0	0	1
ВУС ₁₅	7	10	12
ВУС ₁₅ ²⁷	0	0	1
ВУС ₁₅ ⁹⁰	0	0	1
ВУС ₂₀	6	10	12
ВУС ₂₀ ²⁷	0	0	1
ВУС ₂₀ ⁹⁰	0	0	1

Примечание: ВУС – водоугольных суспензий.

Анализ результатов исследования статической седиментации показал, что обработка ВУС в РГДГК оказывает существенное влияние на процесс расслоения суспензии. За

первый интервал времени не установлено эффекта осаждения частиц угля в составах, обработанных в кавитационном генераторе (табл. 1, цифры, выделенные жирным шрифтом). Расслоение ВУС характерно только для необработанных суспензий в РГДГК. Через 24 ч установлены первые характерные признаки расслоения ВУС, обработанных в РГДГК (составы ВУС₀, ВУС₀²⁷ и ВУС₀⁹⁰). Для суспензий с добавками пирогенетической жидкости в данном временном диапазоне осаждение частиц угля не выявлено. Через 72 ч выдержки ВУС расслоение установлено для всех изучаемых составов. При этом для вязких суспензий (в составе с пирогенетической водой) в сравнении с двухкомпонентным водоугольным топливом расслоение компонент суспензии составило не более 1 мл.

Для того, чтобы оценить влияние кавитационной обработки ВУС на характеристики распыления, проведены экспериментальные исследования дисперсного состава струи. При

проведении экспериментов использовалась пневматическая форсунка (рис. 6), предназначенная для распыления водоугольных топлив, разработанная Институтом теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук [12].

Процесс распыления ВУС пневматической форсункой на стенде (аэродинамический имитатор камеры сгорания энергетического котла) для исследования характеристик струи топлива после распыления, разработанный в Томском политехническом университете, представлен на рис. 7. Процесс распыления осуществлялся при давлении ВУС 0,05 МПа и давлении воздуха 0,3 МПа.

Эффект кавитационной обработки оценивался для двухкомпонентных ВУС (ВУС₀²⁷ и ВУС₀⁹⁰) и наиболее вязких топлив (ВУС₂₀²⁷ и ВУС₂₀⁹⁰) в сравнении с образцами суспензии, приготовленными в шаровой барабанной мельнице (ШБМ).



Рис. 6. Пневматическая форсунка
Fig. 6. Pneumatic atomizer



Рис. 7. Процесс распыления водоугольных суспензий
Fig. 7. Spraying of coal-water slurries

Размер капель (δ) определялся при помощи метода IPI (от англ. Interferometric Particle Imaging) [18–20]. Метод применяется для измерения мгновенных пространственных распределений размеров (от 10 до 1000 мкм) капель в потоке. Основан на восстановлении размеров капель по частоте интерференционной картины от точечных источников света, возникающих на сферических каплях жидкости при освещении их мощным лазерным импульсом (лазерный нож). Высокоскоростная регистрация капель в струе осуществлялась на расстоянии 100 мм от сопла форсунки.

Влияние кавитационной обработки ВУС на изменение среднего размера капель после распыления представлены на рис. 8 и 9 в виде гистограмм. Анализ результатов показал, что увеличение времени обработки ВУС способствует снижению среднего размера капель суспензии в струе.

После обработки двухкомпонентного ВУС в РГДРК в течение 27 с происходит снижение среднего размера капель при распылении на 3,1%. При увеличении времени обработки до 90 с средний размер капель снижается на 5,7%. Обработка в течение 27 с в РГДРК суспензионного топлива с добавлением ПЖ приводит к снижению среднего размера капель на 1,7%, а обработка в течение 300 с – на 3,8%.

По результатам исследований влияния

кавитационной обработки ВУС на изменение средних размеров капель топлива после распыления можно сделать следующий вывод. Снижение среднего размера капель ВУС, в том числе и в составе с пирогенетической жидкостью, окажет положительное влияние на характеристики зажигания и горения суспензии. Следует отметить, что снижение вязкости ВУС также окажет положительное влияние на работу насосного оборудования – снижение затрат энергии на перекачивание менее вязкого топлива (в сравнении с ВУС, приготовленными в ШБМ).

Значение теплотворной способности составов ВУС оценивалось теоретическим методом при помощи уравнения Д.И. Менделеева для расчета низшей теплоты сгорания органических веществ с определенным элементным составом⁵.

$$Q = 339 \cdot C + 1256 \cdot H - 109 \cdot (O - S) - 25,2 \cdot (9 \cdot H - W), \quad (1)$$

где C, H, O, S, W – %-е содержание элементов в исходном топливе.

На рис. 10 в виде зависимости представлено изменение значений теплотворной способности ВУС (см. табл. 1). Значение теплотворной способности двухкомпонентной ВУС составило 8,1 МДж/кг.

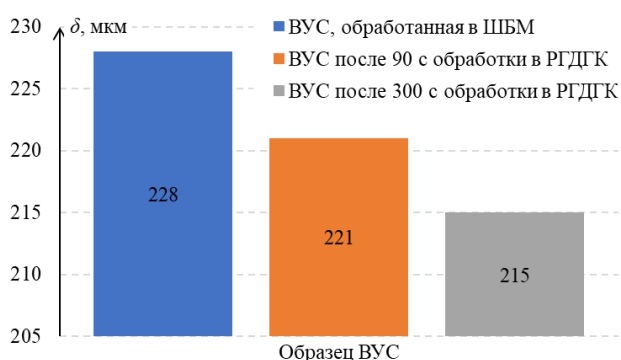


Рис. 8. Изменение средних размеров капель двухкомпонентной водоугольной суспензии ($ВУС_{0^{27}}$ и $ВУС_{0^{90}}$)

Fig. 8. Variation of the average droplet sizes of a two-component coal-water slurry ($CWS_{0^{27}}$ and $CWS_{0^{90}}$)

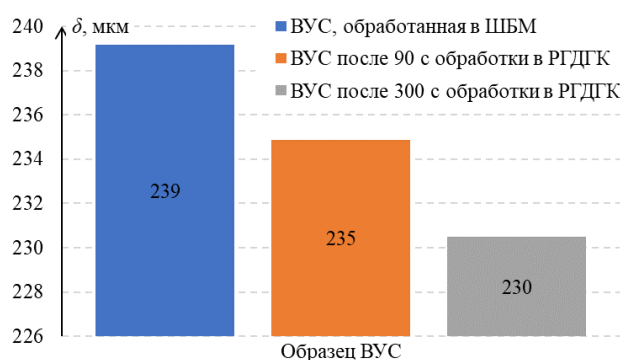


Рис. 9. Изменение средних размеров капель водоугольной суспензии в составе с пирогенетической жидкостью ($ВУС_{20^{27}}$ и $ВУС_{20^{90}}$)

Fig. 9. Variation of the average droplet sizes of a coal-water slurry (CWS) with pyrogenetic liquid ($CWS_{20^{27}}$ and $CWS_{20^{90}}$)

⁵ Годовская К.И., Рябина Л.В., Новик Г.Ю., Гернер М.М. Технический анализ: учеб. пособ. Изд. 2-е, испр. и доп.: М.: Высш. школа, 1972. 48 с.

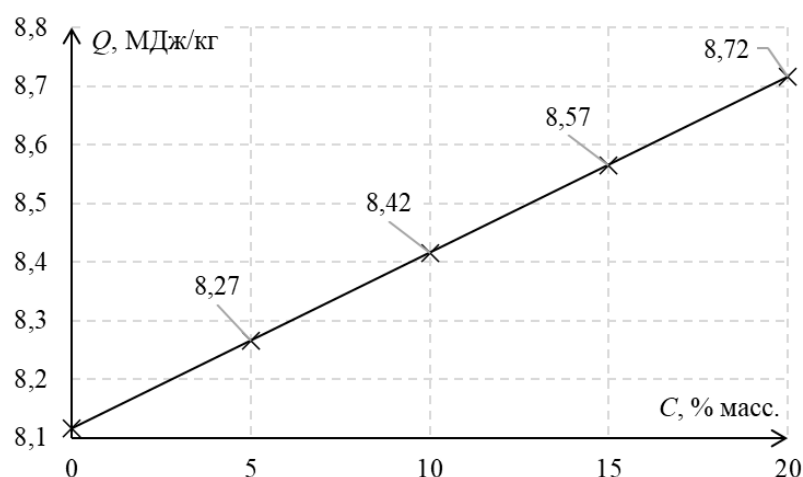


Рис. 10. Теплотворная способность водоугольных суспензий
Fig. 10. Calorific value of coal-water slurries

Теоретические исследования влияния пирогенетической жидкости на теплотворную способность ВУС показали, что введение в состав двухкомпонентного водоугольного топлива третьего компонента взамен воды (равного количества) способствует росту Q суспензии. Для наиболее вязкого топлива ($ВУС_{20}^{27}$ и $ВУС_{20}^{90}$) значение теплотворной способности увеличивается на 6,9%. Такой эффект может оказывать существенное влияние на качество топлива в случае использования отходов углеобогащительных комбинатов (фильтр-кек) для приготовления ВУС.

Можно сделать вывод, что замещение воды в составе ВУС аналогичным по массе количеством пирогенетической жидкости приводит к увеличению вязкости топлива, но и его теплотворной способности. При этом обработка такого топлива в роторном гидродинамическом генераторе кавитаций снижает его вязкость. Уменьшение вязкости и гомогенизация трехкомпонентных водоугольных топлив является причиной снижения среднего размера капель ВУС после распыления пневматической форсункой. Такие свойства и характеристики ВУС после ее обработки в роторном гидродинамическом генераторе кавитаций и последующем распылении позволяют рассматривать пирогенетическую жидкость как перспективный компонент ВУС. Использование РГДРК также позволяет решить проблему низкой реакционной способности ВУС – снизить средний размер капель

после распыления и как следствие сократить время задержки их зажигания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования влияния кавитационной обработки водоугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости на их свойства и характеристики распыления пневматической форсункой. Установлено, что после кавитационной обработки двухкомпонентного водоугольного топлива в течение 90 с значение вязкости снижается на 48%. Введение в состав водоугольного топлива пирогенетической жидкости в количестве от 5 до 20% по массе взамен воды приводит к увеличению вязкости таких суспензий. При этом обработка этих трехкомпонентных водоугольных суспензий в роторном гидродинамическом генераторе кавитаций способствует снижению их вязкости на 27–45%. Исследования статической седиментации показали, что после кавитационной обработки водоугольных суспензий осаждение частиц угля начинается после 24 ч. Образцы суспензии в составе с пирогенетической жидкостью показали лучшую стабильность по сравнению с двухкомпонентным водоугольным топливом. Эксперименты по распылению изучаемых водоугольных суспензий пневматической форсункой показали, что средний размер капель топлива в струе снижается на 1,7–5,7% при использовании кавитационной обработки. Установле-

но, что при введении в состав топлива 20% по массе пирогенетической жидкости значе-ние теплотворной способности увеличивается на 6,9%. Использование пирогенетической жидкости в составе водоугольного топлива и

его обработка в роторном гидродинамическом генераторе кавитаций позволят решить проблему низкой реакционной способности водоугольных суспензий.

Список источников

1. Кашин Е.М., Диденко В.Н. Технология подготовки и газификации экологичного вида топлива // Экологическое образование и охрана окружающей среды. Технические университеты в формировании единого научно-технологического и образовательного пространства СНГ. М.: Ассоциация технических университетов, 2014. Т. 2. С. 192–195.
2. Хрусталева Б.М., Пехота А.Н. Технология эффективного использования углеводородсодержащих отходов в производстве многокомпонентного твердого топлива // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2016. Т. 59. № 2. С. 122–140. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-2-122-140>.
3. Иванова И.Ю., Ижбулдин А.К., Тугузова Т.Ф., Майсюк Е.П. Эколого-экономическая эффективность применения альтернативных энергетических технологий для снижения антропогенной нагрузки в центральной экологической зоне байкальской природной территории // Альтернативная энергетика и экология. 2020. № 25-27. С. 138–146.
4. Герасимова Н.П., Федчишин В.В. Перспективы и возможности использования водоугольного топлива в энергетике // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: матер. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 21–24 апреля 2020 г.). Иркутск: ИРНИТУ, 2020. Т. 2. С. 104–108.
5. Dmitrienko M.A., Strizhak P.A. Coal-water slurries containing petrochemicals to solve problems of air pollution by coal thermal power stations and boiler plants: an introductory review // Science of Total Environment. 2018. Vol. 613-614. P. 1117–1129. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.189>.
6. 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 NO_x emissions // Process Safety and Environmental Protection. 2023. Vol. 169. P. 313–327. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.034>.
7. Хрусталева Б.М., Пехота А.Н., Нгуен Нга Тху, Ву Фан Минь. Твердое топливо на основе отходов малоиспользуемых горючих энергоресурсов // Наука и техника. 2021. Т. 20. № 1. С. 58–65. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-58-65>.
8. Джундубаев А.К., Султаналиев М.С., Мурко В.И., Кулагина Л.В., Баранова М.П. Режимы течения топливных водоугольных суспензий в каналах распыливающих устройств // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 11. № 2. С. 242–249.
9. Syrodoy S.V. The influence of radiative-convective heat transfer on ignition of the drops of coal-water fuel // Thermophysics and Aeromechanics. 2018. Vol. 25. Iss. 3. P. 429–443. <https://doi.org/10.1134/S0869864318030101>.
10. Baranova M.P., Kulagin V.A., Taraban'ko V.E. Nature of stabilization of water-coal fuel suspensions // Russian Journal of Applied Chemistry. 2011. Vol. 84. Iss. 6. P. 939–944. <https://doi.org/10.1134/S1070427211060073>.
11. Дмитриенко М.А., Няшина Г.С., Шлегель Н.Е., Шевырев С.А. Снижение антропогенных выбросов при сжигании углей и отходов их переработки в качестве компонентов органоводоугольных суспензий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 3-4. С. 41–52.
12. Алексеенко С.В., Мальцев Л.И., Кравченко И.В., Дектерев А.А., Кузнецов В.А. Технология приготовления водоугольного топлива и его сжигания в котлах малой мощности // Химия и химическая технология. Современные проблемы: сб. статей / под ред. З.А. Мансурова. Вып. 7. Алматы: Казахский нац. ун-т им. аль-Фараби, 2022. 355 с.
13. Mal'tsev L.I., Belogurova T.P., Kravchenko I.V. Influence of high-energy impact on the physical and technical characteristics of coal fuels // Thermal Engineering. 2017. Vol. 64. Iss. 8. P. 585–590. <https://doi.org/10.1134/S0040601517080067>.
14. Kuznetsov G.V., Romanov D.S., Vershinina K.Yu., Strizhak P.A. Rheological characteristics and stability of fuel slurries based on coal processing waste, biomass and used oil // Fuel. 2021. Vol. 302. P. 121203. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121203>.
15. Loureiro L.M.E.F., Gil P.B.F., Campos F.V.V., Nunes L.J.R., Ferreira J.M.F. Dispersion and flow properties of charcoal oil slurries (ChOS) as potential renewable industrial liquid fuels // Journal of the Energy Institute. 2018. Vol. 91. Iss. 6. P. 978–983. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.08.001>.
16. Tareq M.M., Dafsari R.A., Jung Seungchae, Lee Jeekeun. Effect of the physical properties of liquid and ALR on the spray characteristics of a pre-filming airblast nozzle // International Journal of Multiphase Flow. 2020. Vol. 126. P. 103240. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103240>.
17. Mlkvik M., Stähle P., Schuchmann H.P., Gaukel V., Jedelsky J., Jicha M. Twin-fluid atomization of viscous liquids: the effect of atomizer construction on breakup process, spray stability and droplet size // International Journal of Multiphase Flow. 2015. Vol. 77. P. 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.06.010>.
18. 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 // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 163. P. 114400. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114400>.

19. Alekseenko S.V., Anufrieva I.S., Dektereva A.A., Kuznetsova V.A., Maltsev L.I., Minakova A.V., et al. Experimental and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension fuel // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2019. Vol. 77. P. 288–298. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.04.013>.

20. Alekseenko S.V., Bilsky A.V., Dulin V.M., Markovich D.M. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2007. Vol. 28. Iss. 6. P. 1340–1359. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.05.011>.

References

1. Kashin E.M., Didenko V.N. Technology for environmentally friendly fuel preparation and gasification. In: *Tekhnicheskie universitety v formirovaniy edinogo nauchno-tekhnologicheskogo i obrazovatel'nogo prostranstva SNG = Ecological education and environmental protection. Technical universities in the formation of a single scientific, technological and educational space of the Commonwealth of Independent States*. Moscow: Associatsiya tekhnicheskikh universitetov; 2014, vol. 2, p. 192-195. (In Russ.).
2. Hrustalev B.M., Pekhota A.N. Technology for efficient usage of hydrocarbon-containing waste in production of multi-component solid fuel. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'edineniy SNG. Energetika = Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2016;59(2):122-140. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-2-122-140>.
3. Ivanova I.Yu., Izhibuldin A.K., Tuguzova T.F., Maysyuk E.P. Ecological and economic efficiency of the use of alternative energy technologies to reduce of the anthropogenic load in the central ecological area of the Baikal natural territory. *Alternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*. 2020;25-27:138-146. (In Russ.).
4. Gerasimova N.P., Fedchishin V.V. Prospects and possibilities of using coal-water fuel in power engineering. In: *Povysheniye effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem = Increasing the efficiency of energy production and use in Siberia: Materials of the All-Russian scientific-practical conference with international participation*. 21–24 April 2020, Irkutsk. Irkutsk: National Research Irkutsk Technical Research; 2020, vol. 2, p. 104-108. (In Russ.).
5. Dmitrienko M.A., Strizhak P.A. Coal-water slurries containing petrochemicals to solve problems of air pollution by coal thermal power stations and boiler plants: an introductory review. *Science of Total Environment*. 2018;613-614:1117-1129. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.189>.
6. 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 Environmental Protection*. 2023;169:313-327. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.034>.
7. Khroustalev B.M., Pekhota A.N., Nguyen Nga Thuy, Vu Phap Minh. Solid fuel based on waste of low-utilized combustible energy resources. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*. 2021;20(1):58-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-58-65>.
8. Dzhundubaev A.K., Sultanaliyev M.S., Murko V.I., Kulagina L.V., Baranova M.P. The flow regimes of the fuel water coal slurries in the canals of spraying devices. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2018;11(2):242-249. (In Russ.).
9. Syrodooy S.V. The influence of radiative-convective heat transfer on ignition of the drops of coal-water fuel. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2018;25(3):429-443. <https://doi.org/10.1134/S0869864318030101>.
10. Baranova M.P., Kulagin V.A., Taraban'ko V.E. Nature of stabilization of water-coal fuel suspensions. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2011;84(6):939-944. <https://doi.org/10.1134/S1070427211060073>.
11. Dmitrienko M.A., Nyashina G.S., Shlegel' N.E., Shevyrev S.A. The reduction anthropogenic emission at the combustion of coals and coal processing waste as a component coal-water slurry containing petrochemicals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki = Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(3-4):41-52. (In Russ.).
12. Alekseenko S.V., Mal'cev L.I., Kravchenko I.V., Dekterev A.A., Kuznecov V.A. Technology for coal-water fuel preparation and its combustion in low-power boilers. In: *Mansurov Z.A. (eds.). Himiya i himicheskaya tekhnologiya. Sovremennye problemy: sbornik statej = Chemistry and Chemical Technology. Modern problems: collected articles*. Almaty: Al-Farabi Kazakh National University; 2022, iss. 7, 355 p. (In Russ.).
13. Mal'tsev L.I., Belogurova T.P., Kravchenko I.V. Influence of high-energy impact on the physical and technical characteristics of coal fuels. *Thermal Engineering*. 2017;64(8):585-590. <https://doi.org/10.1134/S0040601517080067>.
14. Kuznetsov G.V., Romanov D.S., Vershinina K.Yu., Strizhak P.A. Rheological characteristics and stability of fuel slurries based on coal processing waste, biomass and used oil. *Fuel*. 2021;302:121203. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121203>.
15. Loureiro L.M.E.F., Gil P.B.F., Campos F.V.V., Nunes L.J.R., Ferreira J.M.F. Dispersion and flow properties of charcoal oil slurries (ChOS) as potential renewable industrial liquid fuels. *Journal of the Energy Institute*. 2018;91(6):978-983. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.08.001>.

16. Tareq M.M., Dafsari R.A., Jung Seungchae, Lee Jeekeun. Effect of the physical properties of liquid and ALR on the spray characteristics of a pre-filming airblast nozzle. *International Journal of Multiphase Flow*. 2020;126:103240. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103240>.
17. Mlkvik M., Stähle P., Schuchmann H.P., Gaukel V., Jedelsky J., Jicha M. Twin-fluid atomization of vis-cous liquids: the effect of atomizer construction on breakup process, spray stability and droplet size. *Inter-national Journal of Multi-phase Flow*. 2015;77:19-31. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.06.010>.
18. Anufriev I.S., Shadrin E.Yu., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharypov O.V. Study of liquid hydrocarbons atomization by super-sonic air or steam jet. *Applied Thermal Engineering*. 2019;163:114400. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114400>.
19. Alekseenko S.V., Anufrieva I.S., Dektereva A.A., Kuznetsova V.A., Maltsev L.I., Minakova A.V., et al. Experimental and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension fuel. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2019;77:288-298. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.04.013>.
20. Alekseenko S.V., Bilsky A.V., Dulin V.M., Markovich D.M. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2007;28(6):1340-1359. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.05.011>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гвоздяков Дмитрий Васильевич,

к.т.н., доцент,
доцент Научно-образовательного центра
И.Н. Бутакова,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 30 а, Россия
✉ dim2003@tpu.ru

Зенков Андрей Викторович,

к.т.н.,
доцент Научно-образовательного центра
И.Н. Бутакова,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 30 а, Россия
avz41@tpu.ru

Мальцев Леонид Иванович,

д.т.н., старший научный сотрудник,
главный научный сотрудник,
Институт теплофизики
им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика
Лаврентьева, 1, Россия
maltzev@itp.nsc.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4699-8289>

Поджаров Юрий Сергеевич,

лаборант,
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика
Лаврентьева, 1, Россия
yura_p@ngs.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry V. Gvozdyakov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Butakov
Research Center,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30a, Lenin pr., Tomsk 634050, Russia
✉ dim2003@tpu.ru

Andrey V. Zenkov,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Butakov
Research Center,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30a, Lenin pr., Tomsk 634050, Russia
avz41@tpu.ru

Leonid I. Maltsev,

Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Chief Researcher of the Federal State Budgetary
Institution of Science named after S.S. Kutateladze
Institute of Thermophysics of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
630090, Novosibirsk, Academician Lavrentiev ave., 1,
Russia
maltzev@itp.nsc.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4699-8289>

Yuri S. Podzharov,

Laboratory Assistant,
Federal State Budgetary Institution of Science named
after S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of
Sciences,
630090, Novosibirsk, Academician Lavrentiev ave., 1,
Russia
yura_p@ngs.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 06.04.2023; одобрена после рецензирования 04.05.2023; принята к публикации 08.06.2023.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 06.04.2023; approved after reviewing 04.05.2023; accepted for publication 08.06.2023.