ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ/ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.43

МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВА ПОДГОТОВКИ ЗАПЫЛЕННОГО ПОТОКА ДЛЯ ПЛАЗМЕННО-ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ

Научная статья

Батухтин А.Г.[1, *], Кобылкин М.В.[2], Риккер Ю.О.[3], Батухтин С.Г.[4], Батухтина И.Ю.[5]
[1] ORCID : 0000-0002-3798-3675;
[2] ORCID : 0000-0002-8020-9394;
[3] ORCID : 0000-0003-2376-6239;
[4] ORCID : 0000-0001-8876-7764;
[5] ORCID : 0000-0003-4537-2695;
[1, 2, 3, 4, 5] Забайкальский государственный университет, Чита, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (batuhtina_ir[at]mail.ru)

Аннотация

В данной статье приведены результаты экспериментального изучения аэродинамических параметров угольно-воздушной смеси в трубопроводе плазменно-топливной системы, их изменения при установке устройств подготовки потока стандартного и модернизированного образцов. Полученные при моделировании данные показали, что при движении топливовоздушной массы в канале возникает торможение частиц с их многократным отражением и гравитационной сепарацией, создается дополнительное сопротивление с существенными потерями давления, что влияет на эффективность сгорания. Предложенный вариант устройства подготовки потока позволяет нивелировать негативные эффекты, снизить коэффициент местного сопротивления на 37,1%, стабилизировать поток с частицами пыли.

Ключевые слова: плазмотрон, аэродинамические параметры, твердое топливо, термохимическая подготовка, дисперсный состав, концентрация.

MODERNISATION OF THE DUSTY-LADEN FLOW PREPARATION DEVICE FOR PLASMA-FUEL SYSTEMS

Research article

Batukhtin A.G.[1, *], Kobylkin M.V.[2], Rikker Y.O.[3], Batukhtin S.G.[4], Batukhtina I.Y.[5]
[1] ORCID : 0000-0002-3798-3675;
[2] ORCID : 0000-0002-8020-9394;
[3] ORCID : 0000-0003-2376-6239;
[4] ORCID : 0000-0001-8876-7764;
[5] ORCID : 0000-0003-4537-2695;
[1, 2, 3, 4, 5] Transbaikal State University, Chita, Russian Federation

* Corresponding author (batuhtina_ir[at]mail.ru)

Abstract

This article presents the results of an experimental study of the aerodynamic parameters of a coal-air mixture in the pipeline of a plasma-fuel system, and how these parameters change when standard and modernised flow preparation devices are installed. The simulation data showed that when the fuel-air mixture moves in the channel, the particles are slowed down by multiple reflections and gravitational separation, creating additional resistance with significant pressure losses, which affects the combustion efficiency. The suggested flow preparation device option allows for the negative effects to be levelled out, the local resistance coefficient to be reduced by 37.1%, and the flow with dust particles to be stabilised.

Keywords: plasmotron, aerodynamic parameters, solid fuel, thermochemical preparation, dispersion composition, concentration.

Введение

Изучение процессов плазменной обработки топливных материалов осуществляются рядом исследовательских групп России [1], [2], [3], [4], странах СНГ [5], [6], [7] и за рубежом [8], [9]. Использование плазменных технологий розжига на ТЭЦ перспективно для повышения эффективности их работы, экологической безопасности, обусловленной снижением вредных выбросов, более полным сгоранием угля, в том числе высокозольного, а также уменьшения топливных затрат в энергосистемах.

Тем не менее, внедрение плазменных технологий в современную энергетику и промышленность России ограничено из-за недостаточно глубокого понимания происходящих при плазменной обработке угля технологических процессов, включая аэродинамические явления. Это обстоятельство выступает ключевым препятствием для масштабирования установок плазменного воспламенения, применяемых в энергетических системах. Решение поставленных задач приведет к результатам, имеющим значительную научную ценность для отрасли.

Помимо технико-экономических доводов актуальность внедрения инновационных технологий сжигания углеводородного топлива согласуется с Энергетической Стратегией России до 2030 года, планирующей уменьшение газовой составляющей на фоне роста доли угля в энергобалансе внутреннего потребления.

Оценивать влияние различных факторов на аэродинамику запылённого потока внутри трубопровода ПТС сложно из-за гравитационного разделения пылевых частиц и деформации профиля скоростей в канале [3], [4], [10]. Для устранения данных эффектов используются устройства подготовки потока (УПП), которые позволяют выровнять профиль скорости текучих сред, устранить закрутку потока, деформацию эпюры его скоростей по сечению трубы.

Цель работы — экспериментальное изучение влияния модернизированного устройства подготовки потока на аэродинамические параметры в канале термохимической плазменно-топливной системы.

Методы и принципы исследования

На рисунке 1 изображена схема лабораторного стенда, на котором проводилось экспериментальное исследование.

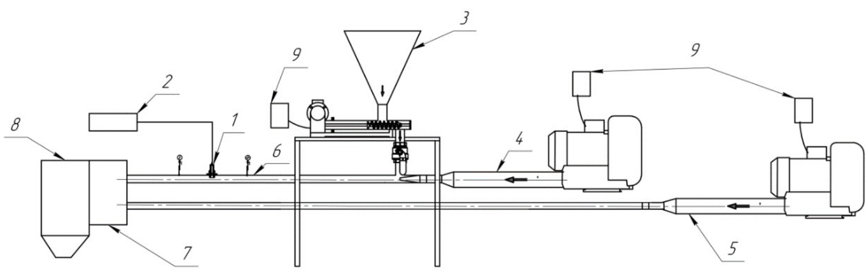


Рисунок 1 - Схема плазменно-топливной установки:
1 – плазмотрон; *2* – пункт электропитания; *3* – топливный бункер; *4*, *5* – устройства воздухоподачи; *6* – контрольно-измерительные системы; *7* – зона термохимической угольной подготовки; *8* – камера циклонного типа; *9* – частотные приводы

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.43.1

Для изучения аэродинамических свойств запыленного потока отдельно смоделирован Т-образный стенд (рис. 2) с длиной трубопровода 2350 мм, диаметром 100 мм. Через отвод a подавалась угольная пыль, УПП был установлен в точке b.

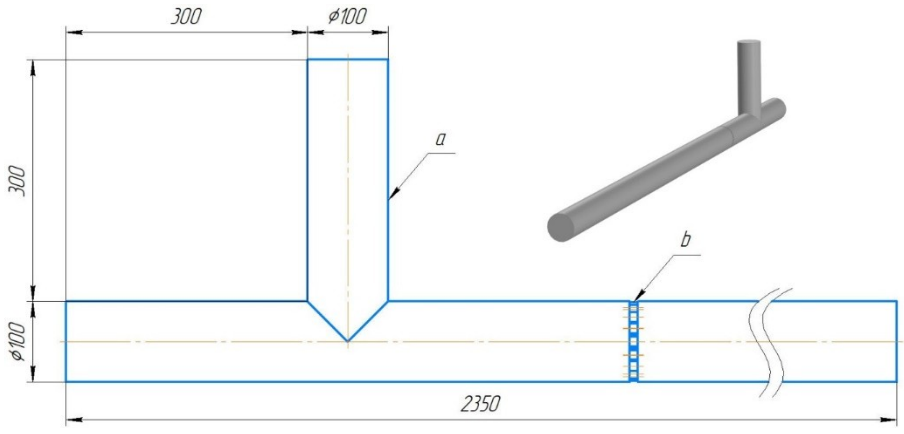


Рисунок 2 - Общий вид стенда с установленным УПП

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.43.2

Распределение давления, скоростей воздушного потока в системе, движения характерной частицы изучали методом CFD-моделирования.

Основные результаты и обсуждение

Результаты стендовых испытаний показали, что без использования УПП (или струевыпрямителя) эпюра скоростей запыленного потока предсказуемо деформируется из-за сил трения о внутренние поверхности канала, осаждения частиц пыли под действием гравитации в нижнюю его часть. Для компенсации данных искажений среди ассортимента разных моделей (УПП «Sprenkle», «Zanker» «Gallagher», «K-Lab NOVA», «NEL Spearman», струевыпрямители «AMCA», «Etoile») наиболее подходящим является УПП «NEL (Spearman)». Последний отличается простотой, надежностью конструкции и позволяет эффективно стабилизировать газодисперсный поток на небольшом расстоянии от источника возмущений, поддерживать равномерное скоростное поле, нивелировать гидравлическое сопротивление.

На рисунке 3 представлен общий вид и разрез модели устройства — пластина с отверстиями на трех окружностях (толщина 0,12 D — диаметр трубопровода), которая монтируется поперек потока.

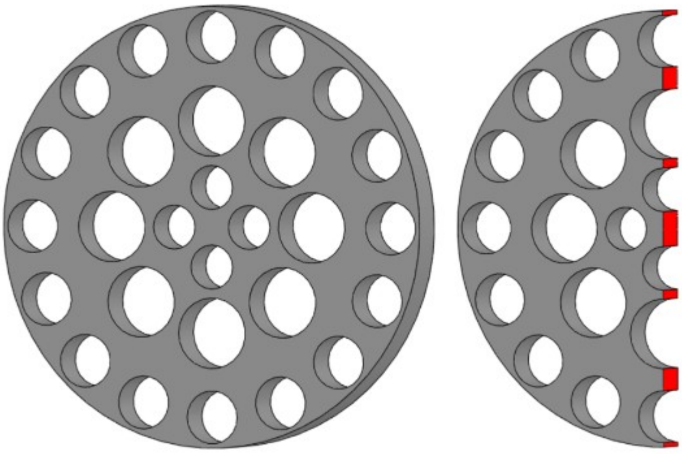


Рисунок 3 - УПП «NEL (Spearman)»
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.43.3

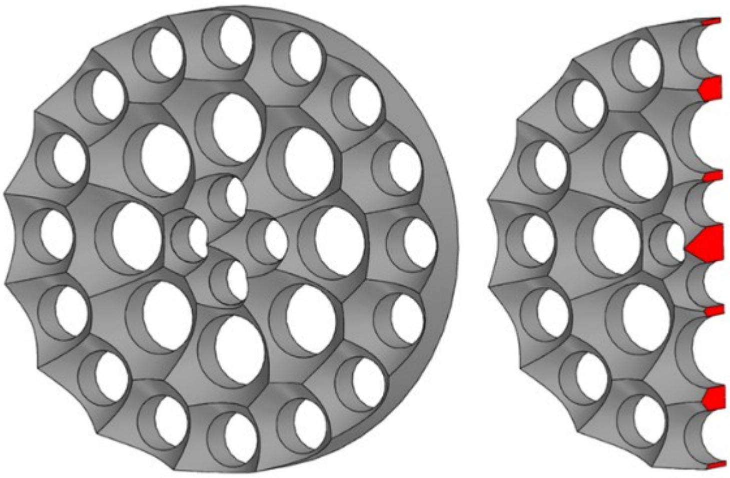
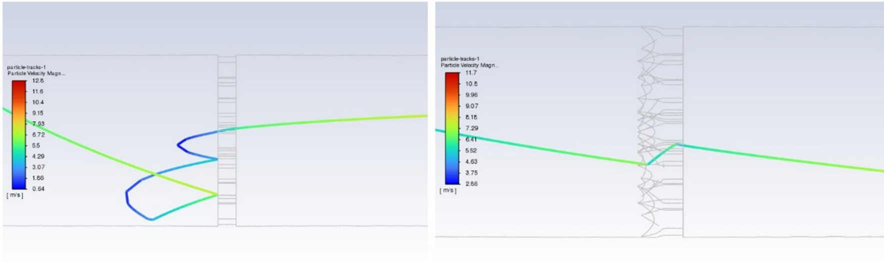


Рисунок 4 - УПП с конструктивными изменениями
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.43.4

Примечание: по ист. [12]

Однако в запылённом потоке частицы замедляются при столкновениях с плоскими поверхностями устройства подготовки потока, многократно отражаясь обратно против направления движения, создавая дополнительное сопротивление потоку (рис. 5а, 6а) и приводя к значительным потерям давления (рис. 7а) согласно данным CFD-моделирования. Замедление частиц способствует усиленной гравитационной сепарации из-за потери ими импульса [11], что ухудшает общую эффективность функционирования (рисунки 5–7).

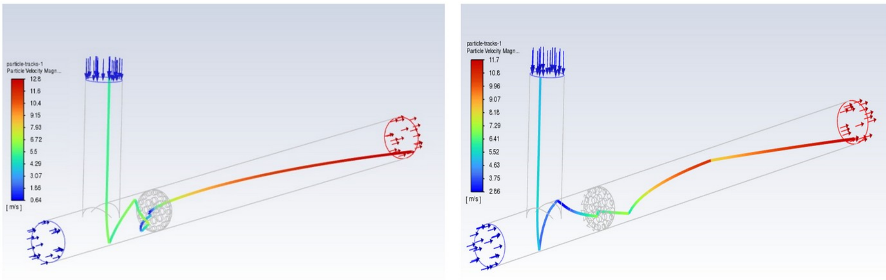
Однако в запылённом потоке частицы замедляются при столкновениях с плоскими поверхностями устройства подготовки потока, многократно отражаясь обратно против направления движения, создавая дополнительное сопротивление потоку (рис. 5а, 6а) и приводя к значительным потерям давления (рис. 7а) согласно данным CFD-моделирования. Замедление частиц способствует усиленной гравитационной сепарации из-за потери ими импульса [11], что ухудшает общую эффективность функционирования (рисунки 5-7).



а *б*

Рисунок 5 - Трек характерной частицы вблизи УПП:
а – исходный вариант; *б* – модернизированный

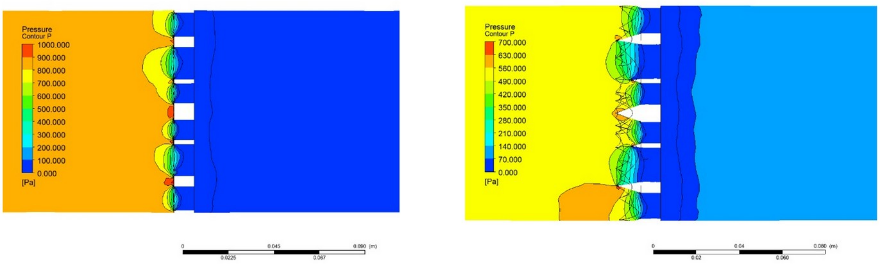
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.43.5



а *б*

Рисунок 6 - Общий вид на трек характерной частицы в стенде:
а – исходный вариант УПП; *б* – модернизированный

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.43.6



а *б*

Рисунок 7 - Графическое изображение распределения давления в области установки УПП:
а – исходный вариант; *б* – модернизированный

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.43.7

С учетом установленных недостатков исходного варианта была разработана новая модель, конструктивные отличия которой могли бы позволить повысить устойчивость профиля скорости и устранить прямое столкновение частиц с поверхностью детали [11], [12].

Модификация проводилась в соответствии с алгоритмом: для типовой трубы (D = 100 мм) принимается толщина пластины 24 мм с отверстиями 10, 12, 16 мм, что соответствует ГОСТу 8.586.1-2005. Далее пластина делится линией по X-оси, толщина нижней и верхней частей пластины от нижней и верхней граней соответственно до медианной линии составляет 12 мм. Зенкирование проводится по рабочим диаметрам отверстий 10–18 мм, 16–33,5 мм и 12–26 мм (рис. 8), в результате чего происходит развертка верхней части пластины и верхняя часть приобретает ряд острых граней, разделяющих отверстия перфорации (рис. 9). С помощью фотополимерного 3D-принтера AnycubicPhotonM3 6K (КНР) печатали деталь из акриловой смолы (рис. 4).

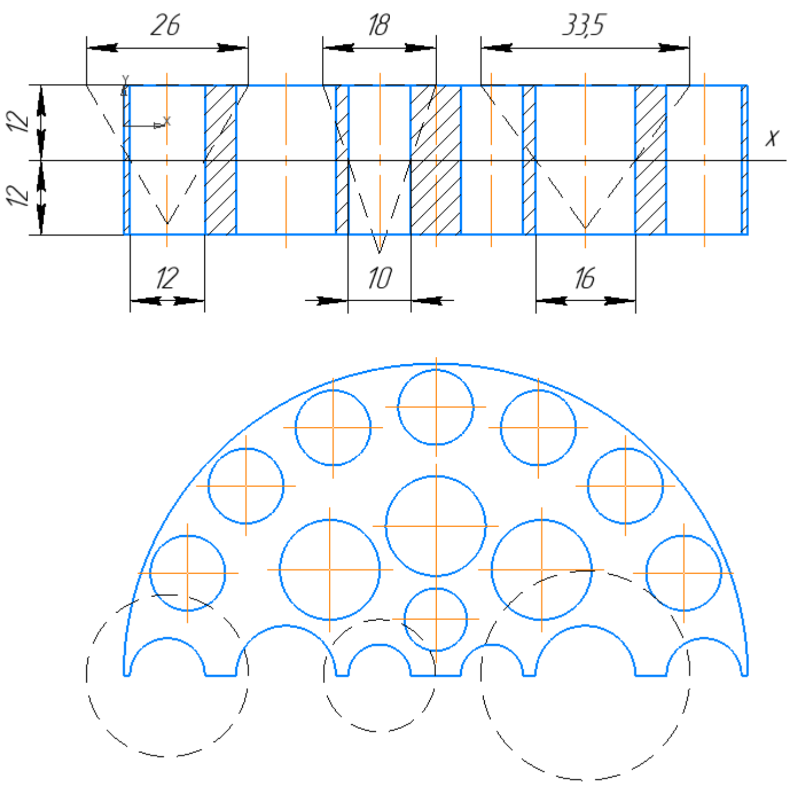


Рисунок 8 - Разрез пластины с разметкой зенкирования
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.43.8

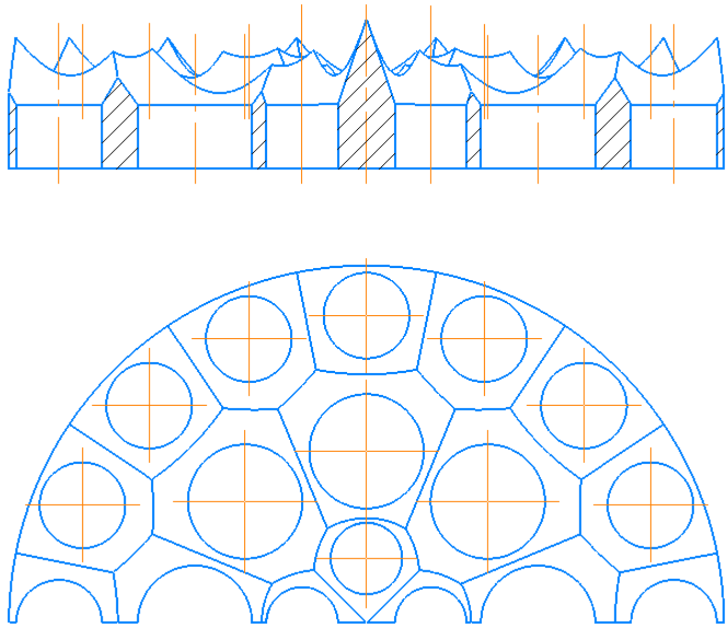


Рисунок 9 - Результат зенкирования
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.43.9

Рабочая поверхность с острой формой граней оптимизированного УПП уменьшает эффект торможения частиц, понижая гидравлическое сопротивление (рис. 5б, 6б, 7б). Дополнительно входная кромка позволяет распределить частицы в объеме трубопровода, что устраняет накопленный эффект гравитационной сепарации.

Идеальная эпюра скоростей смоделирована на рисунке 10 с наложением исследованных вариантов УПП. При использовании УПП в запыленном потоке необходимо добиться максимально приближенной формы эпюры скоростей к идеальной.

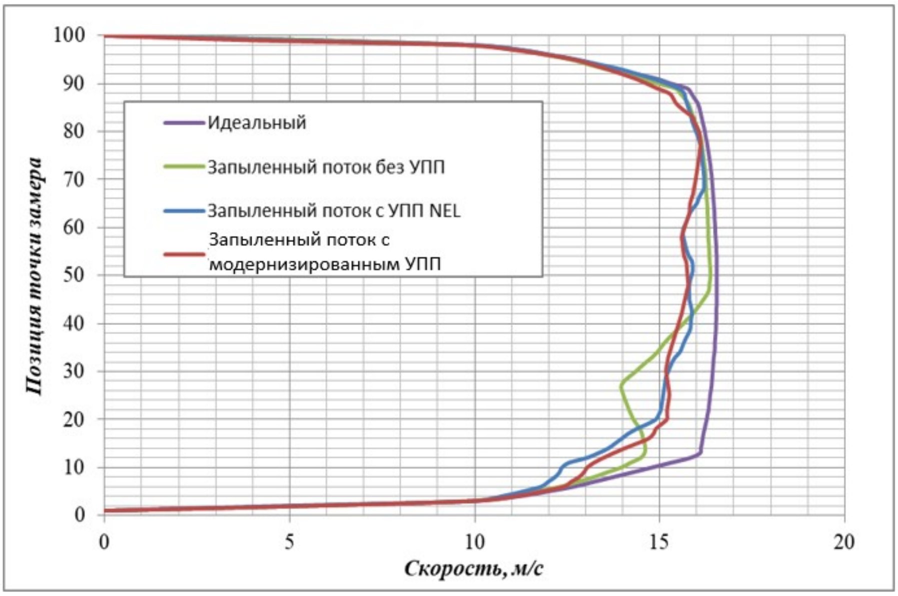


Рисунок 10 - Эпюра скоростей воздушного потока

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.43.10

Примечание: идеальный – частный случай распределения скоростей воздушного потока по сечению канала диаметром 100 мм при высокой турбулизации с максимальной скоростью 16,5 м/с

Расчет известных аналитических метрик оценки качества регрессионных моделей дает объективное заключение об эффективности предложенного варианта модернизации УПП (таблица 1).

Таблица 1 - Сравнительные данные аналитических метрик для разных режимов

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.43.11

Метрика	Оценка относительно двух режимов		
	ИД и БС	ИД и М-УПП	ИД и УПП NEL
MAE	0,69	0,79	0,78
RMSE	1,02	0,95	1,03
R	0,96	0,98	0,97
R^2	0,93	0,97	0,94

Примечание: ИД – идеальный; БС - без стабилизации в условиях запыленности потока; М-УПП – применение модернизированного устройства подготовки потока

По совокупному анализу значений метрик можно сделать вывод об эффективности модернизированного УПП: значение среднеквадратичной ошибки RMSE минимально, что свидетельствует о более точном прогнозе и приближении фактических данных, коэффициент детерминации R^2 имеет наибольшее значение, близок к единице и подтверждает соответствие модели данным.

Расчет коэффициентов местного сопротивления производился на основании экспериментальных данных для труб диаметром 100 мм со средней скоростью потока 15 м/с. Исходные данные к расчету и результаты сведены в таблицу 2.

Таблица 2 - Результаты расчета местного сопротивления

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.43.12

Вид УПП	Перепад давления, Δp	Плотность воздуха, ρ	Скорость потока, ω	Коэффициент местного сопротивления, ξ
«NEL (Spearman)»	830/89	1,226	15	5,37
М-УПП	553/86	1,226	15	3,38

Таким образом, соотнося величины коэффициентов местного сопротивления для УПП с внесенными конструктивными изменениями со стандартным УПП, можно сделать вывод о том, что модернизированный вариант устройства не только позволяет стабилизировать поток с частицами пыли, но и обладает лучшими показателями по сопротивлению, не вызывая потери удельной энергии потока на данном участке.

При внедрении оптимизированного варианта УПП следует учитывать возможный негативный эффект повышенной скорости износа детали вследствие особенностей строения острых граней, подверженных абразивному воздействию движущегося потока частиц твердого топлива.

Представленный в исследовании вариант УПП, изготовленный из органической акриловой фотополимерной смолы, применялся для лабораторных испытаний и является расходным звеном, не предназначенным для долгосрочной работы в условиях агрессивных сред [12]. В производственном процессе повышение ресурса элементов устройства подготовки пылеугольного потока представляет собой одну из важных задач, направленных на обеспечение надёжности и эффективности функционирования системы. Ключевое значение здесь приобретает правильный подбор конструкционного материала и защитных покрытий, обеспечивающих устойчивость к абразивному износу, вызванному воздействием твердых частиц топлива.

Одним из перспективных направлений повышения ресурса является использование высокопрочных нержавеющих сталей и сплавов (легированных Cr, Mo, Ni), отличающихся высоким сопротивлением абразионному износу, что позволяет увеличить срок службы изделий, работающих в сложных условиях эксплуатации [13]. Другим решением может быть использование композитов на основе керамических наполнителей (например, карбид вольфрама в металлической связующей матрице кобальта), обеспечивающих повышенную прочность и износостойкость поверхности, низкий коэффициент трения [14]. Одним из наиболее распространённых методов защиты поверхностей является напыление износостойких покрытий, например, на основе нитрида титана, борида хрома [15], обладающих высокими прочностными характеристиками, низким коэффициентом трения и хорошей адгезией к подложкам.

Проблема повышения ресурса деталей устройства подготовки пылеугольного потока требует комплексного технико-экономического подхода, выбор оптимального материала или покрытия должен основываться на результатах лабораторных и натурных испытаний, учитывающих специфику условий эксплуатации конкретного устройства.

Заключение

Проведено сравнительное исследование изменения характера движения частиц, скорости, давления в трубопроводе ПТС при установке УПП.

Предложено усовершенствованное устройство подготовки запыленного потока для лабораторных исследований, позволяющее снизить эффект торможения и гравитационную сепарацию частиц, гидравлическое сопротивление.

Полученные данные открывают возможность дальнейшего изучения на испытательном стенде скоростных параметров движения воздушного потока и фракций угольной пыли, перепада давления в области расположения генератора низкотемпературной плазмы, аэродинамических процессов в плазменно-топливной системе с учетом горения.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, регистрационный номер в ЕГИСУ НИОКТР 10230222000-2-2.7.3. тема № 123102000012-2 Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива, соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023 г.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.43.13

Funding

The work was carried out as part of a state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, registration number in the USIS 10230222000-2-2.7.3. Topic No. 123102000012-2 Complex study of the aerodynamic characteristics of plasma systems for thermochemical fuel preparation, agreement No. 075-03-2023-028/1 dated 05.10.2023.

Conflict of Interest

None declared.

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.43.13

Список литературы / References

1. Butakov E.B. Plasma ignition system to start up pulverized coal boilers: experimental simulation and full-scale test / E.B. Butakov, A.P. Burdukov, S.V. Alekseenko [et al.] // J. Eng. Thermophys. — 2022. — Vol. 31. — P. 375–383. — DOI: 10.1134/S1810232822030018.

2. Сосин Д.В. Повышение эффективности и увеличение ресурса системы плазменного розжига путем ее модернизации на Гусиноозерской ГРЭС / Д.В. Сосин, А.В. Штегман, И.А. Рыжий [и др.]. // Теплоэнергетика. — 2021. — № 4. — С. 55–63. — DOI: 10.1134/S004036362104007X.

3. Лаврищев О.А. Плазменно-топливные системы и принципы их функционирования / О.А. Лаврищев, А.Б. Устименко // Горение и плазмохимия. — 2022. — № 20. — С. 51–62. — DOI: 10.18321/cpc481.

4. Batukhtin A.G. Enhancing aerodynamic efficiency in solid fuel plasma preparation for power plants / A.G. Batukhtin, E.A. Makhov, M.S. Bass [et al.] // International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE). — 2023. — Vol. 15. — Iss. 57. — № 4. — P. 351–361.

5. Messerle V.E. Simulation and experiment of plasma ignition of low-grade coal / V.E. Messerle, M. Orynbasar, A.B. Ustimenko // Burning and plasma chemistry. — 2024. — Vol. 22 (1). — P. 27–36. — DOI: 10.18321/cpc22(1)27-36.

6. Bolegenova S. Staged supply of fuel and air to the combustion chamber to reduce emissions of harmful substances / S. Bolegenova [et. al.] // Energy. — 2024. — Vol. 293. — P. 130622. — DOI: 10.1016/j.energy.2024.130622.

7. Askarova A.S. The use of a new “clean” technology for burning low-grade coal in on boilers of Kazakhstan TPPs / A.S. Askarova, S.A. Bolegenova, A. Georgiev [et al.] // Bulgarian Chemical Communications. — 2018. — Vol. 50. — Special Iss. G. — P. 53–60.

8. Pawlak-Kruczek H. Application of plasma burners for char combustion in a pulverized coal-fi red (PC) boiler — experimental and numerical analysis / H. Pawlak-Kruczek [et al.] // Energy. — 2023. — Vol. 279. — P.128115. — DOI: 10.1016/j.energy.2023.128115.

9. Youssefi R. Pilot-scale experiences on a plasma ignition system for pulverized fuels / R. Youssefi, J. Maier, G. Scheffknecht // Energies. — 2021. — Vol. 14. — P. 4726. — DOI: 10.3390/en14164726.

10. Messerle V. Plasma—fuel systems for clean coal technologies / V. Messerle, A. Ustimenko, O. Lavrichshev // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Energy. — 2021. — Vol. 174. — Iss. 2. — P. 79–83. — DOI: 10.1680/jener.19.00053.

11. Батухтин А.Г. Изучение способов построения профиля скорости потока в трубе малого диаметра / А.Г. Батухтин, М.С. Басс, М.В. Кобылкин [и др.] // International Journal of Humanities and Natural Sciences. — 2023. — Т. 11-4. — Вып. 86. — С. 7–13. — DOI: 10.24412/2500-1000-2023-11-4-7-13.

12. Кобылкин М.В. К вопросу о недостатках устройства подготовки потока «NEL (Shearman)» в условиях запыленного потока / М.В. Кобылкин, Ю.О. Риккер, А.Г. Батухтин // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: материалы XXIVМеждународной научно-практической конференции (Чита, 25-29 ноября 2024 г.). — Чита: ЗабГУ, 2024. — С. 41–44. — EDN: FTTYQU.

13. Bushueva E.G. Structure and abrasive wear resistance of stainless-steel surface layers alloyed with boron / E.G. Bushueva, E.A. Drobyaz, M.G. Golkovsky [et al.] // Journal Friction and Wear. — 2023. — № 44. — P. 354–361. — DOI: 10.3103/S1068366623060041.

14. Wang Z. High-entropy carbide ceramics: a perspective review / Z. Wang, Z.T. Li, S.J. Zhao [et al.] // Tungsten. — 2021. — № 3. — P. 131–142. — DOI: 10.1007/s42864-021-00085-7.

15. Rao J. Titanium aluminium nitride and titanium boride multilayer coatings designed to combat tool wear / J. Rao, A. Sharma, T. Rose // Coatings. — 2018. — Vol. 8. — Iss. 1. — DOI: 10.3390/coatings8010012.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Butakov E.B. Plasma ignition system to start up pulverized coal boilers: experimental simulation and full-scale test / E.B. Butakov, A.P. Burdukov, S.V. Alekseenko [et al.] // J. Eng. Thermophys. — 2022. — Vol. 31. — P. 375–383. — DOI: 10.1134/S1810232822030018.

2. Sosin D.V. Povishenie effektivnosti i uvelichenie resursa sistemi plazmennogo rozzhiga putem yee modernizatsii na Gusinoozerskoi GRES [Improving the efficiency and increasing the resource of the plasma ignition system by upgrading it at the Gusinoozerskaya GRES] / D.V. Sosin, A.V. Shtegman, I.A. Rizhii [et al.]. // Teploenergetika [Thermal Power Engineering]. — 2021. — № 4. — P. 55–63. — DOI: 10.1134/S004036362104007X. [in Russian]

3. Lavrishchev O.A. Plazmenno-toplivnie sistemi i printsipi ikh funktsionirovaniya [Plasma-Fuel Systems and Principles of Their Functioning] / O.A. Lavrishchev, A.B. Ustimenko // Gorenie i plazmokhimiya [Combustion and Plasma Chemistry]. — 2022. — № 20. — P. 51–62. — DOI: 10.18321/cpc481. [in Russian]

4. Batukhtin A.G. Enhancing aerodynamic efficiency in solid fuel plasma preparation for power plants / A.G. Batukhtin, E.A. Makhov, M.S. Bass [et al.] // International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE). — 2023. — Vol. 15. — Iss. 57. — № 4. — P. 351–361.

5. Messerle V.E. Simulation and experiment of plasma ignition of low-grade coal / V.E. Messerle, M. Orynbasar, A.B. Ustimenko // Burning and plasma chemistry. — 2024. — Vol. 22 (1). — P. 27–36. — DOI: 10.18321/cpc22(1)27-36.

6. Bolegenova S. Staged supply of fuel and air to the combustion chamber to reduce emissions of harmful substances / S. Bolegenova [et. al.] // Energy. — 2024. — Vol. 293. — P. 130622. — DOI: 10.1016/j.energy.2024.130622.

7. Askarova A.S. The use of a new “clean” technology for burning low-grade coal in on boilers of Kazakhstan TPPs / A.S. Askarova, S.A. Bolegenova, A. Georgiev [et al.] // Bulgarian Chemical Communications. — 2018. — Vol. 50. — Special Iss. G. — P. 53–60.

8. Pawlak-Kruczek H. Application of plasma burners for char combustion in a pulverized coal-fi red (PC) boiler — experimental and numerical analysis / H. Pawlak-Kruczek [et al.] // Energy. — 2023. — Vol. 279. — P.128115. — DOI: 10.1016/j.energy.2023.128115.

9. Youssefi R. Pilot-scale experiences on a plasma ignition system for pulverized fuels / R. Youssefi, J. Maier, G. Scheffknecht // Energies. — 2021. — Vol. 14. — P. 4726. — DOI: 10.3390/en14164726.

10. Messerle V. Plasma—fuel systems for clean coal technologies / V. Messerle, A. Ustimenko, O. Lavrichshev // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Energy. — 2021. — Vol. 174. — Iss. 2. — P. 79–83. — DOI: 10.1680/jener.19.00053.

11. Batukhtin A.G. Izuchenie sposobov postroeniya profilya skorosti potoka v trube malogo diametra [Study of Methods for Constructing a Flow Velocity Profile in a Small-Diameter Pipe] / A.G. Batukhtin, M.S. Bass, M.V. Kobilkin [et al.] // International Journal of Humanities and Natural Sciences. — 2023. — Vol. 11-4. — Iss. 86. — P. 7–13. — DOI: 10.24412/2500-1000-2023-11-4-7-13. [in Russian]

12. Kobilkin M.V. K voprosu o nedostatkakh ustroistva podgotovki potoka «NEL (Shearman)» v usloviyakh zapilennogo potoka [On the Shortcomings of the NEL (Shearman) Flow Preparation Device in a Dusty Flow] / M.V. Kobilkin, Yu.O. Rikker, A.G. Batukhtin // Kulaginskie chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennikh protsessov [Kulagin Readings: Techniques and Technologies of Production Processes]: Proceedings of the 24th International Scientific and Practical Conference (Chita, November 25-29, 2024). — Chita: ZabGU, 2024. — P. 41–44. — EDN: FTTYQU. [in Russian]

13. Bushueva E.G. Structure and abrasive wear resistance of stainless-steel surface layers alloyed with boron / E.G. Bushueva, E.A. Drobyaz, M.G. Golkovsky [et al.] // Journal Friction and Wear. — 2023. — № 44. — P. 354–361. — DOI: 10.3103/S1068366623060041.

14. Wang Z. High-entropy carbide ceramics: a perspective review / Z. Wang, Z.T. Li, S.J. Zhao [et al.] // Tungsten. — 2021. — № 3. — P. 131–142. — DOI: 10.1007/s42864-021-00085-7.

15. Rao J. Titanium aluminium nitride and titanium boride multilayer coatings designed to combat tool wear / J. Rao, A. Sharma, T. Rose // Coatings. — 2018. — Vol. 8. — Iss. 1. — DOI: 10.3390/coatings8010012.