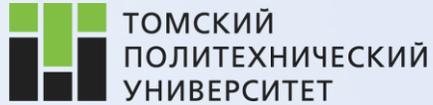


XI Всероссийская конференция с международным участием  
Горение топлива: теория, эксперимент, приложения



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



Heat Mass Transfer  
Laboratory

TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

[tpu.ru](http://tpu.ru)



# Особенности распыления композиционных жидких топлив на основе фильтр-кека каменного угля

Стрижак Павел Александрович,

Кузнецов Гений Владимирович,

Волков Роман Сергеевич



г. Новосибирск

9-12 ноября 2021 г.

Исследование поддержано  
грантом Министерства науки и  
высшего образования  
Российской Федерации,  
Соглашение №075-15-2020-806  
(договор №13.1902.21.0014)



## Водоугольные топлива

- Вода + угольная пыль [1]
- Вода + отход углеобогащения [2]



В качестве компонентов может применяться не только **уголь**, но, например, **металлическая пыль** [8], **битум** [9]

## Водомасляные и масложугольные суспензии

- Вода + отработанные масла / спирты / мазут [3]
- Уголь + масло [4]



## Органоводоугольные топлива

- Вода + уголь + нефтяной компонент [5]
- Влажный отход углеобогащения + нефтяной компонент [6]



Альтернативные наименования топливных суспензий [10]:  
*композиционные жидкие топлива; композиционные водосодержащие топлива; жидкоугольное топливо и др.*

## Суспензии на основе растительных компонентов

- Древесный уголь, растительные отходы + вода [7]



- Z. Xue, Q. Guo, Y. Gong, Y. Wang, G. Yu, In-situ atomization and flame characteristics of coal water slurry in an impinging entrained-flow gasifier, Chemical Engineering Science. 2018. V. 190, 248-259.
- P.A. Strizhak, K.Y. Vershinina, Maximum combustion temperature for coal-water slurry containing petrochemicals, Energy. 2017. V. 120, 34-46.
- J.C. Lasheras, I.M. Kennedy, F.L. Dryer, Burning of distillate fuel droplets containing alcohol or water: effect of additive concentration, Combustion Science and Technology. 1981. V. 26, No. 3-4, 161-169.
- K. Miyasaka, C.K. Law, Combustion and agglomeration of coal-oil mixtures in furnace environments, Combustion Science and Technology. 1980. V. 24, No. 1-2, 71-82.
- K. Svoboda, M. Pohořelý, M. Jeremiáš, P. Kameniková, S. Skoblja, Fluidized bed gasification of coal-oil and coal-water-oil slurries by a gas containing CO<sub>2</sub>-oxygen mixture, Chemical Engineering Transactions. 2010. V. 21, 211-216.
- D.O. Glushkov, S.Y. Lyrshchikov, S.A. Shevyrev, P.A. Strizhak, Burning properties of slurry based on coal and oil processing waste, Energy & Fuels, 2016. V. 30, No. 4, 3441-3450.
- M. Zhu, Z. Zhang, Y. Zhang, P. Liu, D. Zhang, An experimental investigation into the ignition and combustion characteristics of single droplets of biochar water slurry fuels in air, Applied Energy. 2017. V. 185, 2160-2167.
- F. Takahashi, I.J. Heilweil, F.L. Dryer, Disruptive burning mechanism of free slurry droplets, Combustion Science and Technology. 1989. V. 65, No. 1-3, 151-165.
- C.A. Miller, R.K. Srivastava, Combustion of Orimulsion and its generation of air pollutants. Progress in Energy and Combustion Science. 2000. V. 26, No. 2, 131-160.
- D.O. Glushkov, R.I. Egorov, D.M. Klepikov, High-speed contactless measurements of temperature evolution during ignition and combustion of coal-based fuel pellets, International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. V. 175, 121359.



- Улучшение экологических характеристик работы топливосжигающих установок (**снижение газовых антропогенных выбросов**) [1-3].
- **Утилизация** совокупности невостробованных отходов.
- **Снижение** темпов потребления традиционных топлив.



### Дополнительные решаемые задачи:

- Снижение себестоимости вырабатываемой энергии;
- Возможность трубопроводной транспортировки;
- Улучшение условий пожаровзрывобезопасности энергетических предприятий.

1. D.O. Glushkov, P.A. Strizhak, M.Yu. Chernetskii, Organic Coal-Water Fuel: Problems and Advances (Review), Thermal Engineering. 2016. V. 63, No. 10, P. 707–717.
2. V.V. Dorokhov, G.V. Kuznetsov, K.Yu. Vershinina, P.A. Strizhak, Relative energy efficiency indicators calculated for high-moisture waste-based fuel blends using multiple-criteria decision-making, Energy. 2021. V. 234, 121257.
3. V.V. Dorokhov, G.V. Kuznetsov, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak, Composition of a gas and ash mixture formed during the pyrolysis and combustion of coal-water slurries containing petrochemicals, Environmental Pollution. 2021. V. 285, 117390.





**Делягин Г.Н., Горлов Е.Г., Ходаков Г.С.**  
(Институт горючих ископаемых, Москва);  
**Саломатов В.В., Богомолов А.Р.,**  
**Алексеев С.В., Бурдуков А.П., Мальцев Л.И.**  
**и др.** (ИТ СО РАН, Новосибирск);  
**Овчинников Ю.В.** (НГТУ, Новосибирск); **Мурко**  
**В.И.** (СибГИУ, Новокузнецк); **Пузырев Е.М.**  
(Барнаул); **Кузнецов Г.В., Сыродой С.В.** (ТПУ,  
Томск); **Патраков Ю.Ф., Архипов В.А.,**  
**Федорова Н.И.** (Институт угля и углехимии, г.  
Кемерово); **Дектерев А.А., Чернецкий М.Ю.,**  
**Баранова М.П.** (СФУ, Красноярск); **Богомолов**  
**А.Р., Шевырев С.А.** (КузГТУ, г. Кемерово);  
**Gajewski W., Kijo-Kleczkowska A., Wang H.,**  
**Svoboda K., Liu H., Lee C.H., Sakai T., и др.**

**Патраков Ю.Ф., Чернецкий М.Ю., Архипов В.А.,**  
**Бурдуков А.П., Горлов Е.Г., Лиштван И.И.,**  
**Мурко В.И., Стрижак П.А., Глушков Д.О.,**  
**Вершинина К.Ю., Валиуллин Т.Р., Liu J., Jiang**  
**X., Sakai T.,**  
**Lee C.H., Manwani P., Svoboda K., Lee C.H.,**  
**Kim S.H., Mohapatra S.K., He Q., Xie D. и др.**

Приготовление  
суспензий,  
реологические  
характеристики,  
транспортировка,  
стабильность,  
распыл [1-6]

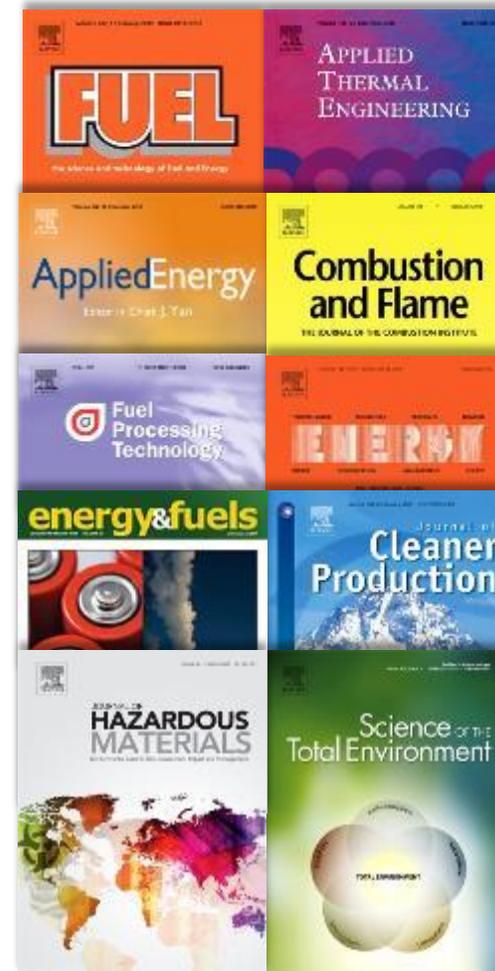
Зажигание  
и  
горение [1-6]

1. D.O. Glushkov, P.A. Strizhak, M.Yu. Chernetskii, Organic Coal-Water Fuel: Problems and Advances (Review), Thermal Engineering. 2016. V. 63, No. 10, 707–717.
2. G.V. Kuznetsov, R.S. Volkov, P.A. Strizhak, Determining water content in a liquid fuel by the luminosity of its droplet, Chemical Engineering Science. 2021. V. 233, 116415.
3. Д.В. Антонов, К.Ю. Вершинина, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак, Математическое моделирование зажигания капли органоводоугольного топлива, Инженерно-Физический журнал, 2021. Т. 94, № 4, 1-13.
4. K. Verшинina, S. Shevyrev, P. Strizhak, Coal and petroleum-derived components for high-moisture fuel slurries, Energy. 2021. V. 219, 119606.
5. G.V. Kuznetsov, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak, T.R. Valiullin, Experimental research into the ignition and combustion characteristics of slurry fuels based on dry and wet coal processing waste, Journal of the Energy Institute. 2021. V. 97, 213–224.
6. V.V. Dorokhov, G.V. Kuznetsov, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak, Composition of a gas and ash mixture formed during the pyrolysis and combustion of coal-water slurries containing petrochemicals, Environmental Pollution. 2021. V. 285, 117390.



## Высокорейтинговые международные журналы (Q1 Web of Science, ИФ=3-11)

- Fuel
- Applied Thermal Engineering
- Energy
- Applied Energy
- Fuel Processing Technology
- Energy and Fuels
- Journal of Cleaner Production
- Combustion and Flame
- Journal of Hazardous Materials
- Science of the Total Environment
- Environmental Pollution
- Energy Conversion and Management



Общее число статей в  
2010 году

54

Общее число статей в  
2015 году

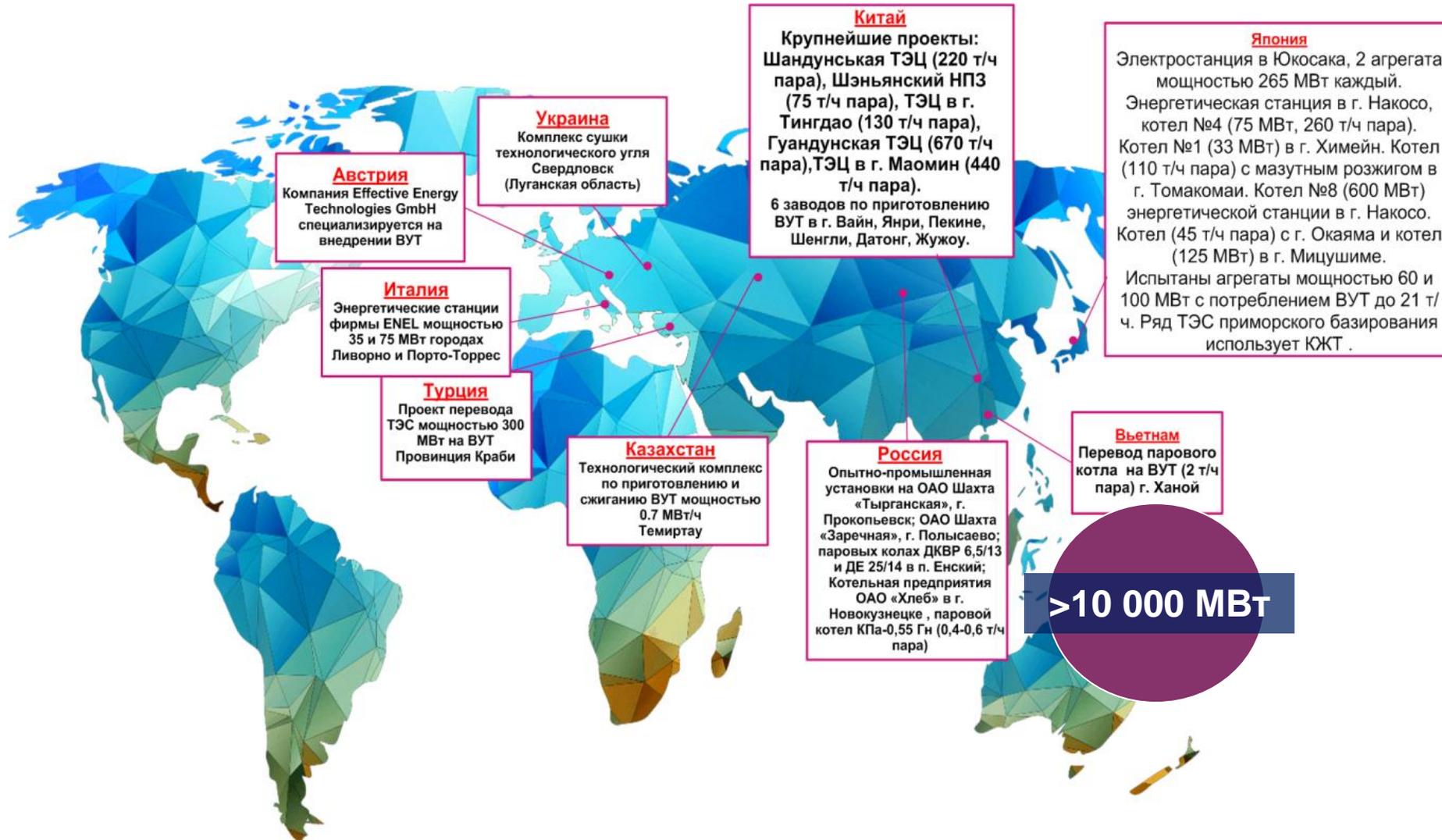
98

Общее число статей в  
2021 гг.

>250



# Наиболее крупные ТЭС, осуществляющие сжигание композиционных жидких топлив [1-3]



1. G.S. Nyashina, P.A. Strizhak, The influence of liquid plant additives on the anthropogenic gas emissions from the combustion of coal-water slurries, Environmental Pollution. 2018. V. 242, 31–41.
2. G.V. Kuznetsov, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak, T.R. Valiullin, Experimental research into the ignition and combustion characteristics of slurry fuels based on dry and wet coal processing waste, Journal of the Energy Institute. 2021. V. 97, 213–224.
3. K. Vershinina, G. Nyashina, P. Strizhak, Lab-scale combustion of high-moisture fuels from peat, coal waste and milled lignite, waste and biomass valorization. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01482-2>.



В рамках данного направления изучают [1-6]:

- Влияние скорости движения капель на изменение их диаметра;
- Влияние поверхностного натяжения на диаметры распыленных капель от (при разных скоростях капель);
- Распределение частиц в распыленном топливе;
- Механизмы первичного и вторичного распада капель при распыле;
- Влияние соотношения «топливо-воздух» на качество распыла;
- Скорости испарения жидкой компоненты при распыле и др.

Типичные проблемы при распыле суспензий:

- Быстрый износ форсуночных устройств;
- Засорение форсунок;
- Отсутствие серийно выпускаемых форсунок;
- Определение оптимальных параметров конструкции форсунки и др.

Распыл суспензии во многом обусловлен реологическими параметрами топлива (вязкость, текучесть) [1-5]

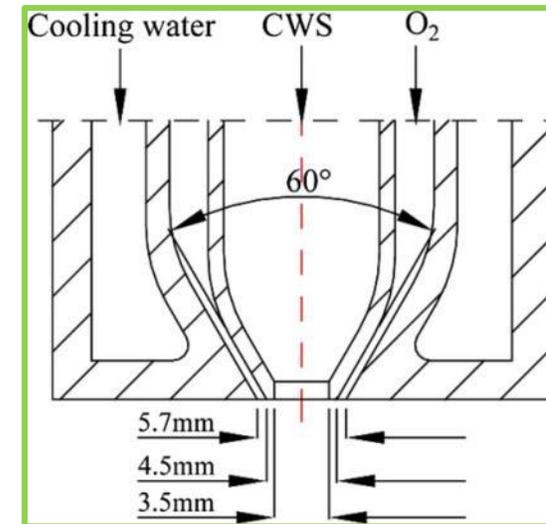


Схема наконечника горелки [1]

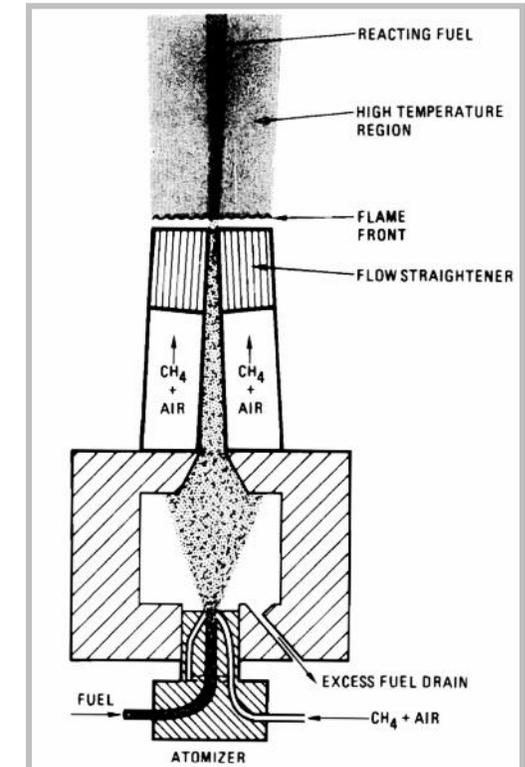
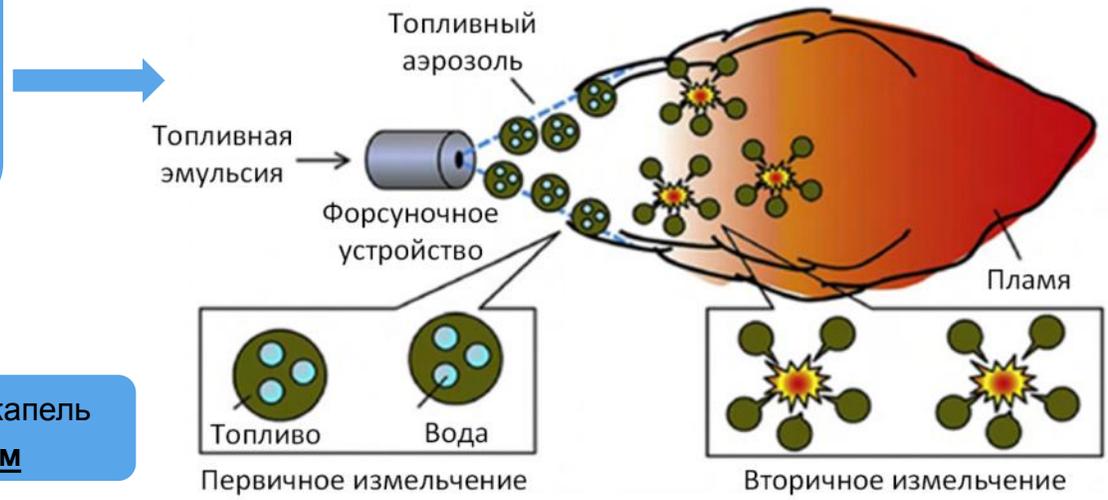


Схема ламинарного проточного реактора и системы подачи суспензии [5]

1. Z. Xue, Q. Guo, Y. Gong, Y. Wang, G. Yu, In-situ atomization and flame characteristics of coal water slurry in an impinging entrained-flow gasifier, Chemical Engineering Science. 2018. V. 190, 248-259.
2. В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.И. Карпенко, И.М. Засыпкин, Ю.А. Сенчурова, А. Риестерер, Результаты исследований процессов распыления и сжигания суспензионного угольного топлива, Сборник научных статей Современная наука. 2012. Т. 9, № 1, 89-96.
3. Ю.А. Сенчурова, Е.В. Заречнева, Математическое моделирование процесса распыления и сжигания водоугольного топлива в вихревой топке, Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2012. Т. 94, № 6, 122-127.
4. F.O. Addo-Yobo, M.J. Pitt, H.A. Obiri, The effects of particle size on the mechanisms of atomization of suspensions using hydraulic spray nozzles, AIChE Journal. 2011. V. 57, No. 8, 2007-2024.
5. D.J. Holve, T.H. Fletcher, Comparative combustion studies of ultrafine coal/water slurries and pulverized coal, Combustion Science and Technology. 1987. V. 52, No. 4-6, 269-291.
6. R. Volkov, T. Valiullin, O. Vysokomornaya, Spraying of composite liquid fuels based on types of coal preparation waste: current problems and achievements: Review, Energies, 2021. V. 14, 7282.

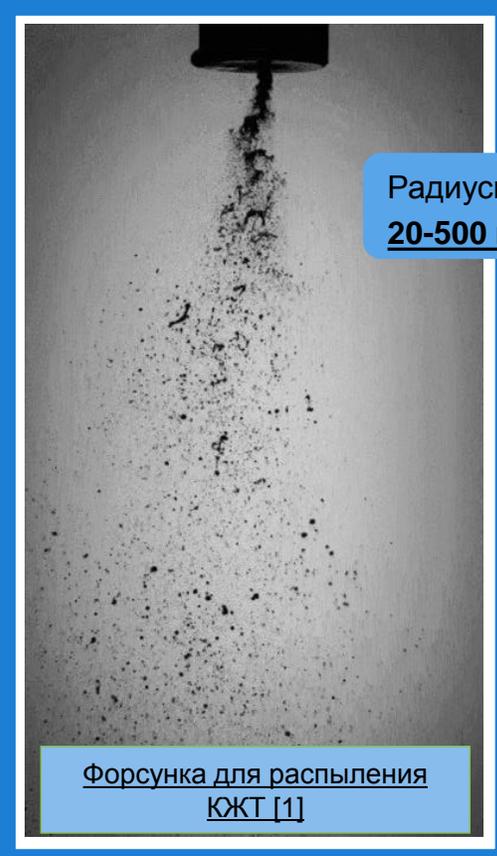


**Первичное измельчение [1]**  
**Распыление топлив форсуночными устройствами**



**Вторичное измельчение [2-4]**

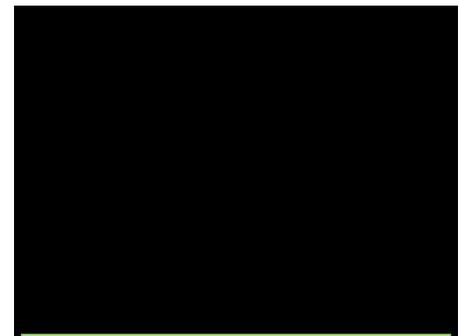
- Столкновения капель
- Разрушение в потоке
- Соударение со стенкой
- Взрывной распад



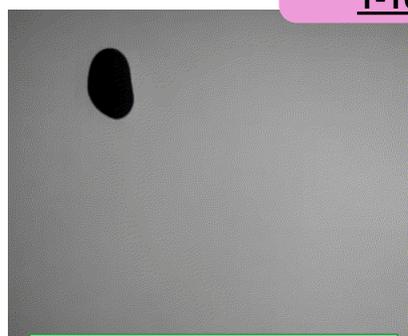
Радиусы капель **20-500 мкм**

Форсунка для распыления КЖТ [1]

Радиусы капель **1-100 мкм**



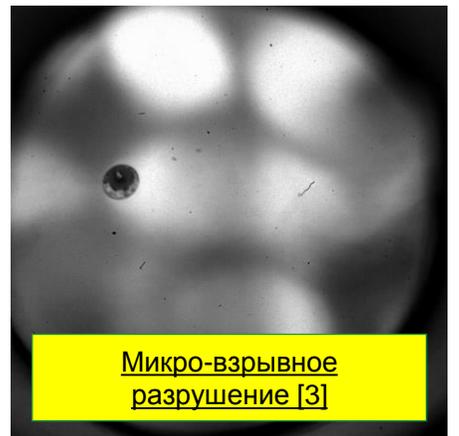
Соударения капель между собой [2]



Разрушение капли в газовом потоке [2]



Соударение капли с твердой поверхностью [2]

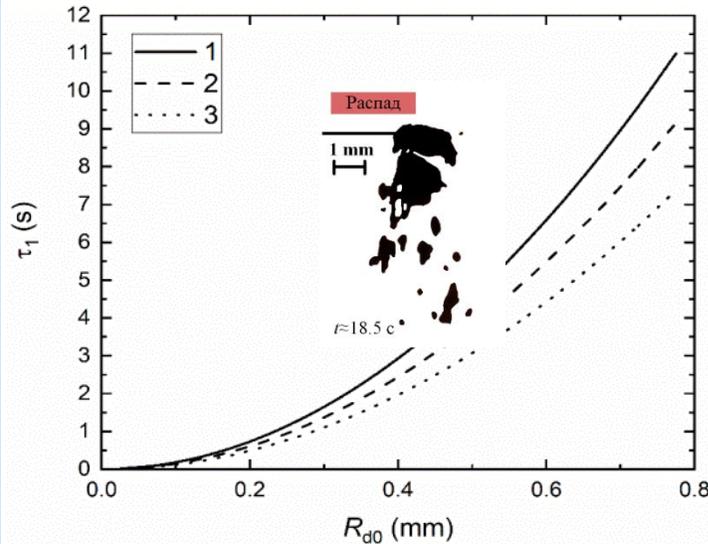


Микро-взрывное разрушение [3]

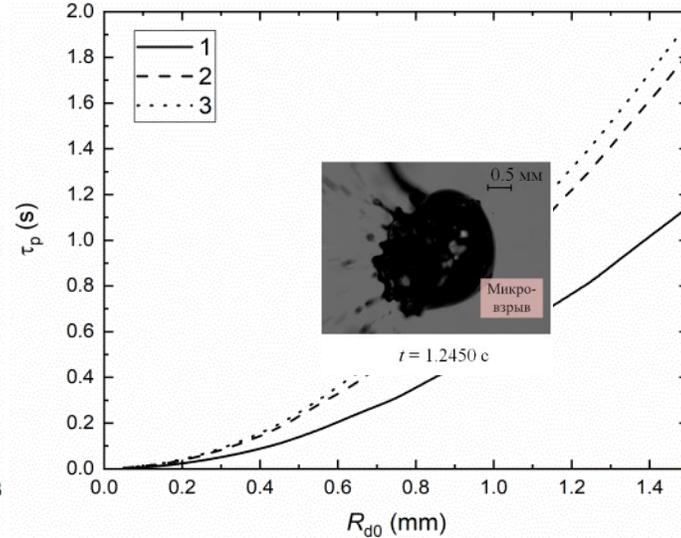
1. G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, T.R. Valiullin, R.S. Volkov, Atomization behavior of composite liquid fuels based on typical coal processing wastes, Fuel Processing Technology. 2022. V. 225, 107037.
2. N.E. Shlegel, P.A. Strizhak, D. Tarlet, J. Bellettre, Comparing the integral characteristics of secondary droplet atomization under different situations, International Communications in Heat and Mass Transfer. 2019. V. 108, 1004329.
3. D.V. Antonov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, O. Rybdylova, S.S. Sazhin, Micro-explosion and autoignition of composite fuel/water droplets, Combustion and Flame. 2019. V. 210, 479-489.
4. D.V. Antonov, G.V. Kuznetsov, R.M. Fedorenko, P.A. Strizhak, Micro-explosion of a two-component droplet: How the initial temperature of the water core affects the breakup conditions and outcomes, Powder Technology. 2021, V. 382, 378–387.



## Влияние начальных размеров [1, 2]



Зависимости времен задержки фрагментации **ВУТ** от начальных размеров капель. Параметры расчетов:  $T_g=1500$  К;  $U_d=0$  м/с; массовая концентрация угольных частиц = 40 % (1); 50 % (2); 60 % (3).



Зависимости времен задержки фрагментации **ОБУТ** от начальных размеров капель. Параметры расчетов:  $T_g=1500$  К;  $U_d=0$  м/с; объемная концентрация топлива = 10 %; массовая концентрация угольных частиц = 50 % (1); 5 % (2); 0 % (3).

## Комплексный анализ времени задержки фрагментации [1, 2]

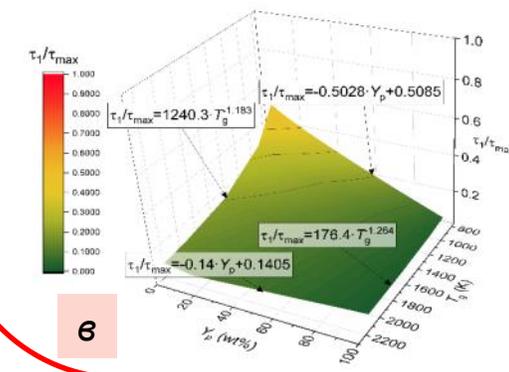
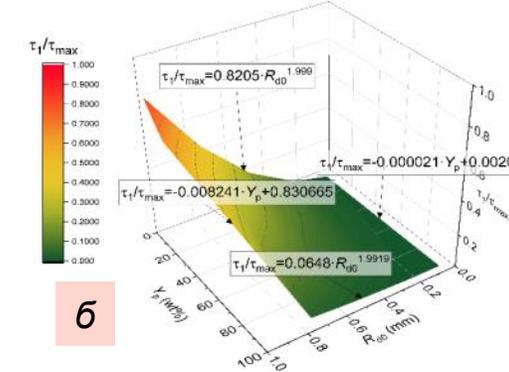
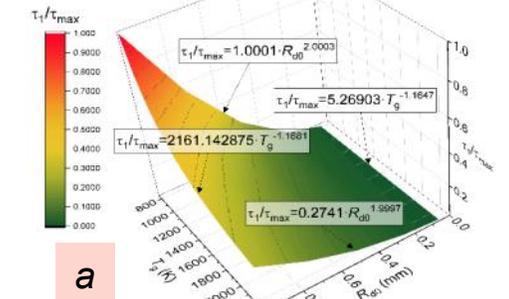
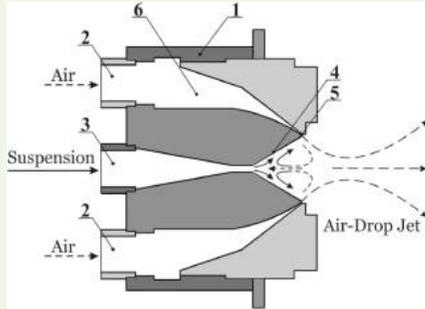


Диаграмма с иллюстрацией вклада размера и температуры (а), размера и концентрации твердого компонента (б), температуры и концентрации твердого компонента (в), где максимальное зарегистрированное время задержки распада составило  $T_{max}=37.4$  с.

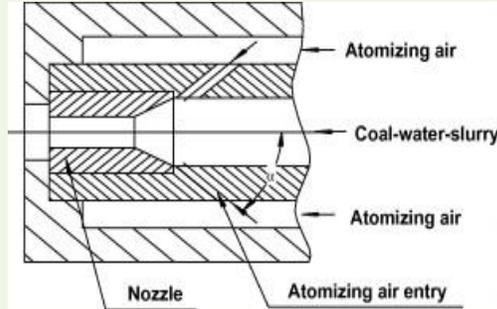
1. D.V. Antonov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, S.S. Sazhin, Puffing/micro-explosion in droplets of rapeseed oil and water with coal micro-particles, *Under review Fuel*. 2021.
2. D.V. Antonov, G.V. Kuznetsov, R.M. Fedorenko, P.A. Strizhak, Micro-explosion of a two-component droplet: How the initial temperature of the water core affects the breakup conditions and outcomes, *Powder Technology*. 2021. V. 382, 378–387.



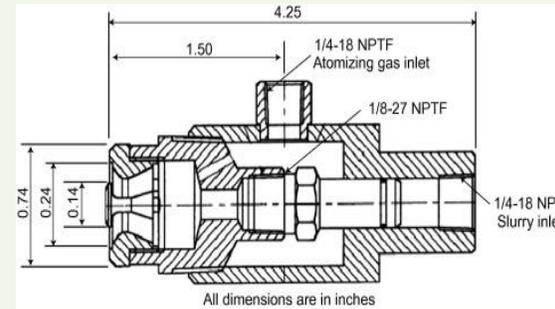
Пневматическое сопло для суспензионного топлива с эффектом Коанда [1]



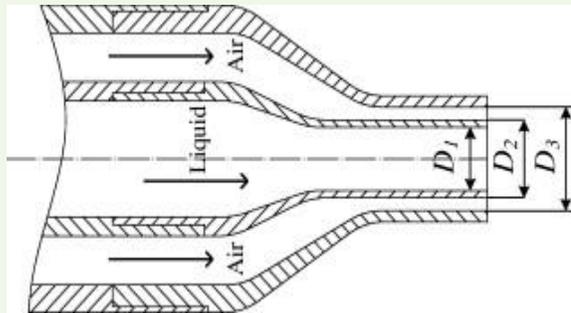
Керамические, твердосплавные и металлические сопла ВУТ [2]



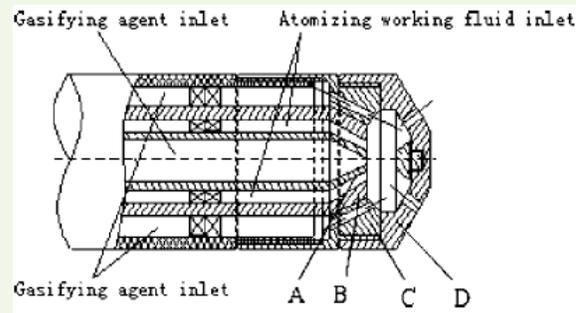
Двойной распылитель ВУТ [3]



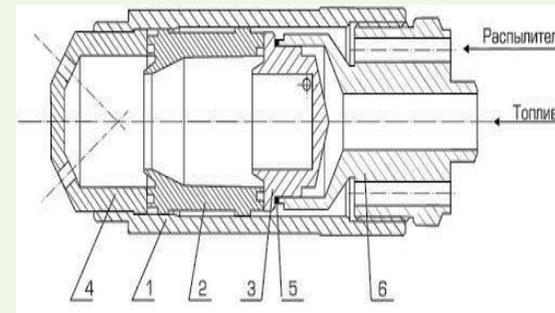
Коаксиальный двухжидкостный распылитель ВУТ [4]



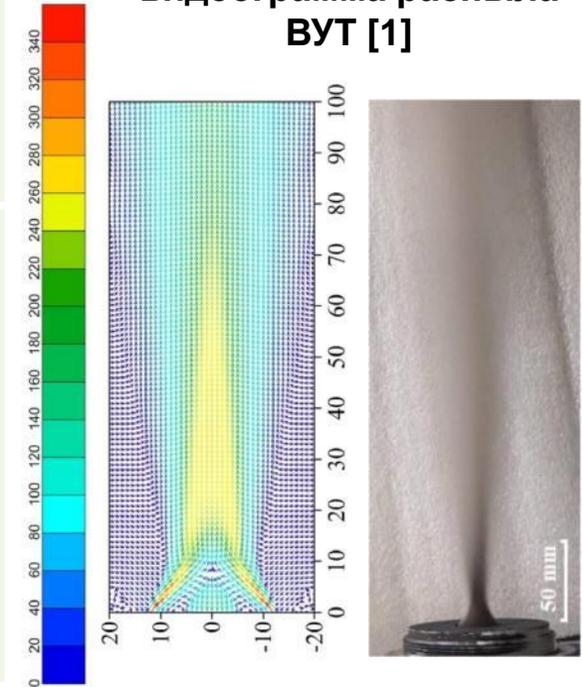
Многоступенчатая форсунка ВУТ [5]



Форсунка "факел-вут" для распыливания водоугольного топлива [6]



Поле скорости и видеограмма распыла ВУТ [1]



1. S.V. Alekseenko, I.S. Anufriev, A.A. Dekterev, V.A. Kuznetsov, L.I. Maltsev, A.V. Minakov, M.Yu. Chernetskiy, E.Yu. Shadrin, O.V. Sharypov, Experimental and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension fuel, International Journal of Heat and Fluid Flow. 2019. V.199, 288–298.
2. D. Jianxin, D. Zeliang, Z. Houming, T. Yuanqiang Performance and wear characteristics of ceramic, cemented carbide, and metal nozzles used in coal–water–slurry boilers, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2009. V. 27, 919–926.
3. S.G. Daviault, O.B. Ramadan, E.A. Matida, P.M. Hughes, R. Hughes, Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer, Fuel. 2012. V. 98, 183–193.
4. H. Zhao, Y.-B. Hou, H.-F. Liu, X.-S. Tian, J.-L. Xu, W.-F. Li, Y. Liu, F.-Y. Wu, J. Zhang, K.-F. Lin, Influence of rheological properties on air-blast atomization of coal water slurry, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2014. V. 211, 1–15.
5. H. Yu, C. Zhang, J. Liu, K. Cen, Experimental study of the atomizing performance of a new type of nozzle for coal water slurry, Energy & Fuels. 2008. V. 22, 1170–1173.
6. Патент РФ № 2492390. Форсунка "факел-вут" для распыливания водоугольного топлива. 2013 г.
7. R. Volkov, T. Valiullin, O. Vysokomornaya, Spraying of composite liquid fuels based on types of coal preparation waste: current problems and achievements: Review, Energies, 2021. V. 14, 7282.



## Практически отсутствует комплексный подход к анализу характеристик распыления

Источник	Распылитель	Метод исследования	Состав	Скорость потока (м/с)	Радиус капель (мкм)	Угол раскрытия струи (°)	Угол отклонения струи (°)	Расход топлива (кг/ч)	Соотношение расходов «воздух/топливо»
[1]	Пневматическая форсунка	Particle Image Velocimetry - PIV	Водоугольная суспензия	20-260	-	-	-	200	-
[2]	Двойной распылитель	Phase Doppler anemometry, laser interferometry (Mie scattering)	Водоугольная суспензия	13	25-300	67	2.6	80	0.5
			Суспензия нефтешлама	10		81	2.8		
[3]	«Шипучая» форсунка	Laser scattering (laser particle size analyzer LS-2000)	Суспензия нефтешлама (61.5%) и осадка сточных вод (5-10%)	-	10-75	-	-	90	0.11
								150	0.065
								210	0.02
			Суспензия нефтешлама (61.5%)	-		-	95	0.125	
								130	0.075
				175	0.04				
[4]	Двойной распылитель с внутренним смешиванием	PIV system of measuring the flow characteristics (velocity, shape, and intensity)	Водоугольная паста (75%)	-	700-4200	30-35	-	500	0.1, 0.4, 0.9
			Водоугольная паста (60%)				-		
			Водоугольная паста (40%)				-		
[5]	Многоступенчатое сопло	Laser scattering (Malvern 2600 Particle Sizer)	Водоугольная суспензия (57.8%)	-	25-60	-	-	70, 50, 38	0.1, 0.15, 0.25
	«Шипучая» форсунка							135, 110, 90	0.07, 0.13, 0.2
								140, 125, 110	0.1, 0.12, 0.15
								60, 40, 30	0.15, 0.3, 0.42
	Сопло с внутренним смешиванием							200, 170, 130	0.06, 0.1, 0.17
								220, 180, 135	0.03, 0.1, 0.17
								90, 75, 60	0.07, 0.1, 0.17
								155, 145, 140	0.07, 0.09, 0.11
							255, 205, 170	0.03, 0.07, 0.1	
[6]	Распылительная горелка	The D38-mm high-temperature endoscope; the high speed PCO camera	Водоугольная суспензия (61%)	-	225-2400	15.9	-	8-12	0.42-0.99
[7]	Распылительная горелка	The D38-mm high-temperature endoscope; the high speed PCO camera	Водоугольная суспензия (61%)	1-6	-	10-65	-	10	0.46-0.7

- S.V. Alekseenko, I.S. Anufriev, A.A. Dekterev, V.A. Kuznetsov, L.I. Maltsev, A.V. Minakov, M.Yu. Chernetskiy, E.Yu. Shadrin, O.V. Sharypov, Experimental and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension fuel, International Journal of Heat and Fluid Flow. 2019. V. 199, 288–298.
- S.G. Daviault, O.B. Ramadan, E.A. Matida, P.M. Hughes, R. Hughes, Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer, Fuel. 2012. V. 98, 183–193.
- X. Ma, Y. Duan, M. Liu, Atomization of petroleum-coke sludge slurry using effervescent atomizer, Experimental Thermal and Fluid Science. 2013. V. 46, 131–138.
- P. Lu, M. Zhang, Experimental investigation on atomizing characteristics of coal–water paste for pressurized fluidized bed, Fuel. 2004. V. 83, 2109–2114.
- K. Yuan, L. Chen, C. Wu, Study on characteristics of different types of nozzles for coal-water slurry atomization, Journal of Thermal Science. 2001. V. 10, 331–335.
- X. Wu, Y. Gong, Q. Guo, Z. Xue, G. Yu, Experimental study on the atomization and particle evolution characteristics in an impinging entrained-flow gasifier, Chemical Engineering Science. 2019. V. 207, 542-555.
- X. Wu, Q. Guo, Y. Gong, C. Cheng, L. Ding, F. Wang, G. Yu, Visualization study on particle flow behaviors during atomization in an impinging entrained-flow gasifier, Chemical Engineering Science. 2020. V. 225, 115834.

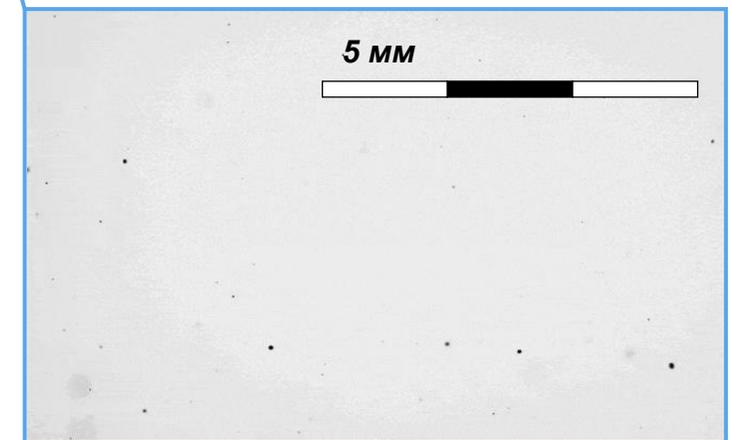
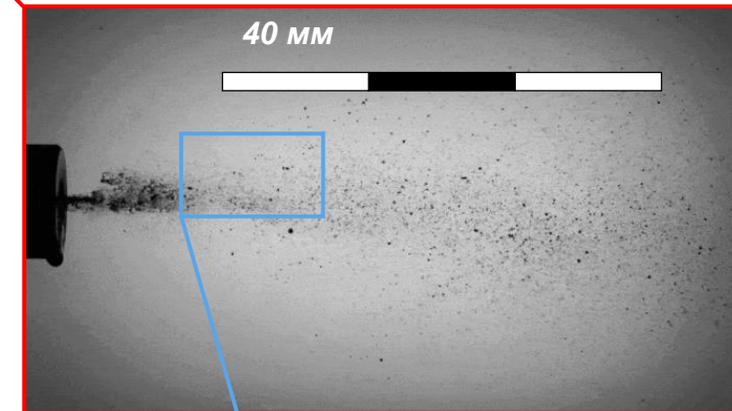
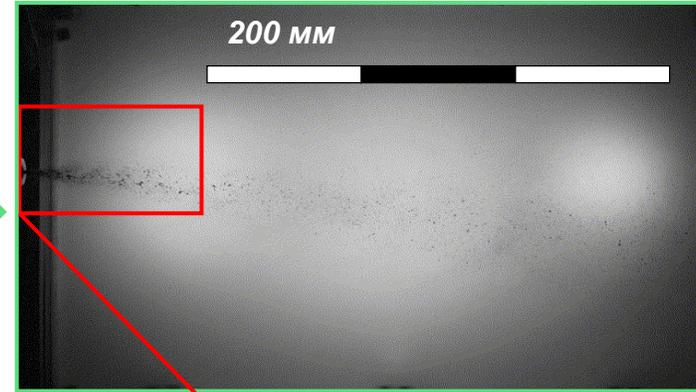
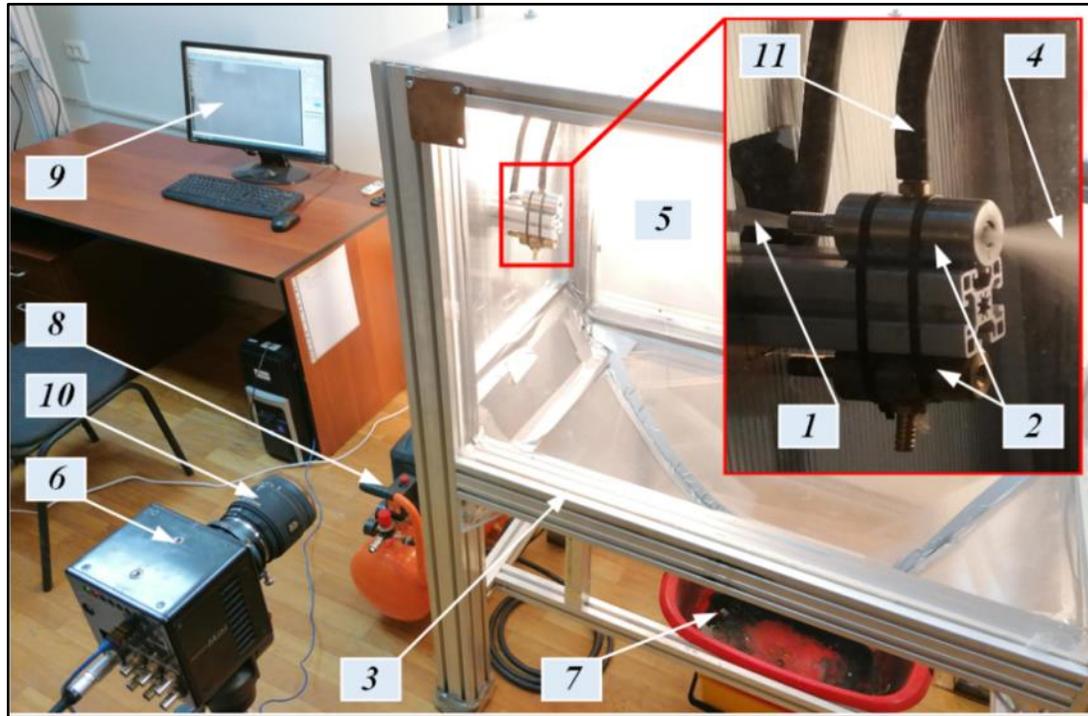


# Наиболее интересные вопросы, возникающие при изучении характеристик распыления КЖТ [1, 2]

- какой **минимальный размер капель ОБУТ и ВУТ** можно получить при распылении;
- каково **соотношение (доля) капель** с разными размерами в факеле распыла;
- как влияет **концентрация отходов углеобогащения** в составе ОБУТ и ВУТ на основные характеристики потока: угол раскрытия струи, скорости движения капель, размеры капель, траекторию движения капельного потока;
- как влияет **примесь жидкого горючего компонента и древесной биомассы** в составе ОБУТ и ВУТ на характеристики их распыления;
- как влияет **размер частиц угля/углешлама** в составе ОБУТ и ВУТ на характеристики их распыления;
- как влияет **взаимное расположение форсунок** на характеристики распыления ОБУТ и ВУТ .

1. G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, T.R. Valiullin, R.S. Volkov, Atomization behavior of composite liquid fuels based on typical coal processing wastes, Fuel Processing Technology. 2022. V. 225, 107037.
2. D.V. Antonov, G.V. Kuznetsov, R.M. Fedorenko, P.A. Strizhak, Micro-explosion of a two-component droplet: How the initial temperature of the water core affects the breakup conditions and outcomes, Powder Technology. 2021. V. 382, 378–387.

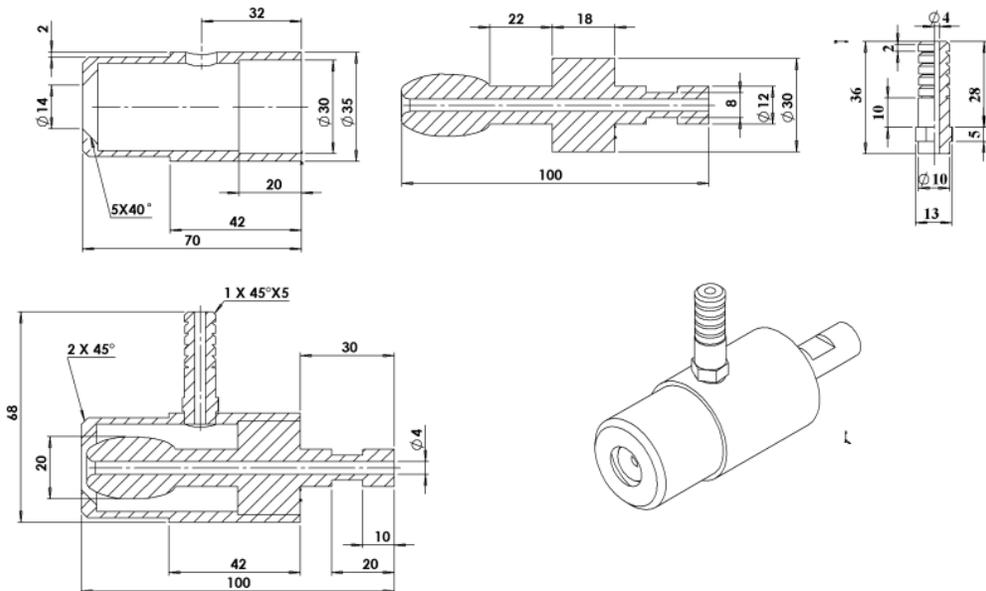




## Внешний вид экспериментального стенда \*:

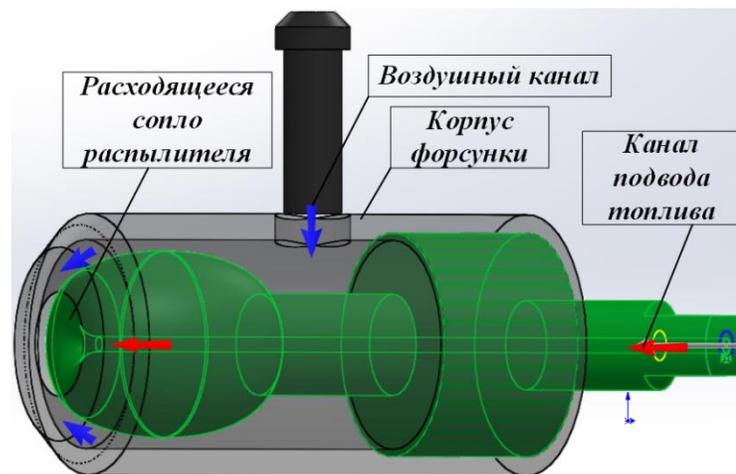
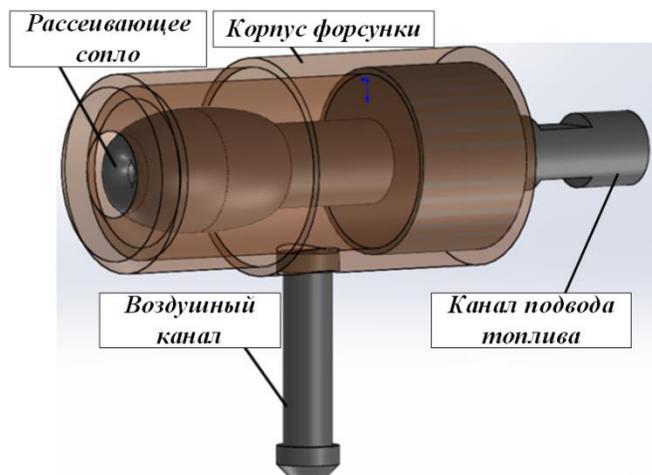
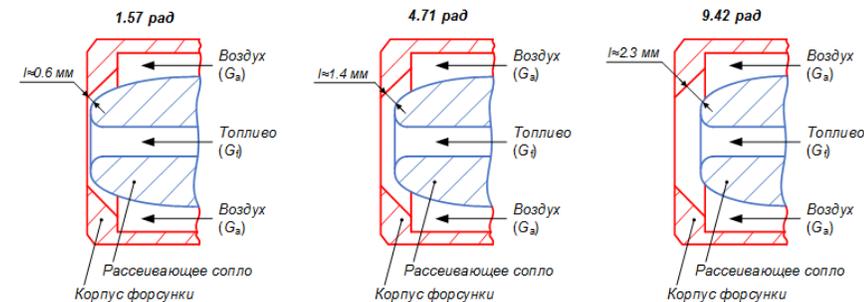
- 1 – шток для выдавливания исследуемого топлива;
- 2 – форсунки;
- 3 – прозрачная камера для распыления исследуемого топлива;
- 4 – струя распыления;
- 5 – система прожекторов;
- 6 – высокоскоростная видеокамера;
- 7 – емкость для сбора капель распыленного топлива;
- 8 – воздушный компрессор;
- 9 – персональный компьютер;
- 10 – объектив;
- 11 – шланг подачи воздуха на форсунку





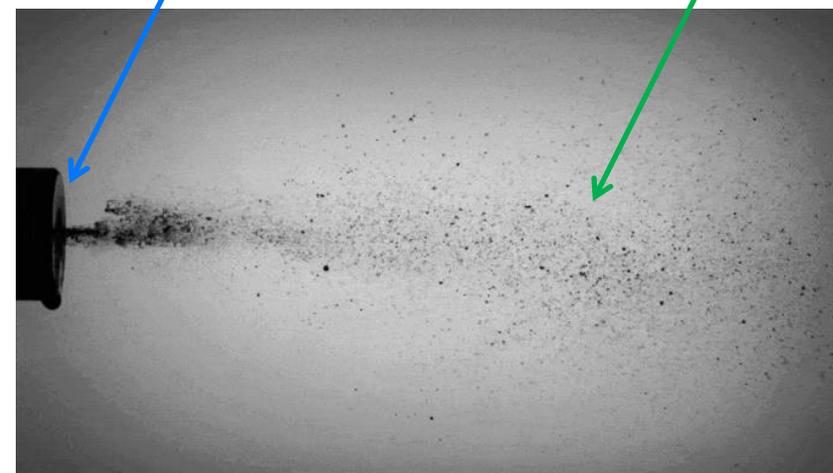
Форсунка, разработанная для **распыления ВУТ/ОВУТ**. Универсальная конструкция позволяет впрыскивать жидкие и пылевидные топлива. За счет регулирования угла поворота распылительного устройства (рассеивающего сопла в корпусе форсунки) имеется **возможность варьирования дисперсности капель**.

## Угол поворота:



## Форсунка

## Капельный поток ВУТ



\* G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, T.R. Valiullin, R.S. Volkov, Atomization behavior of composite liquid fuels based on typical coal processing wastes, Fuel Processing Technology. 2022. V. 225, 107037.



## Компоненты ВУТ и ОВУТ [1, 2]

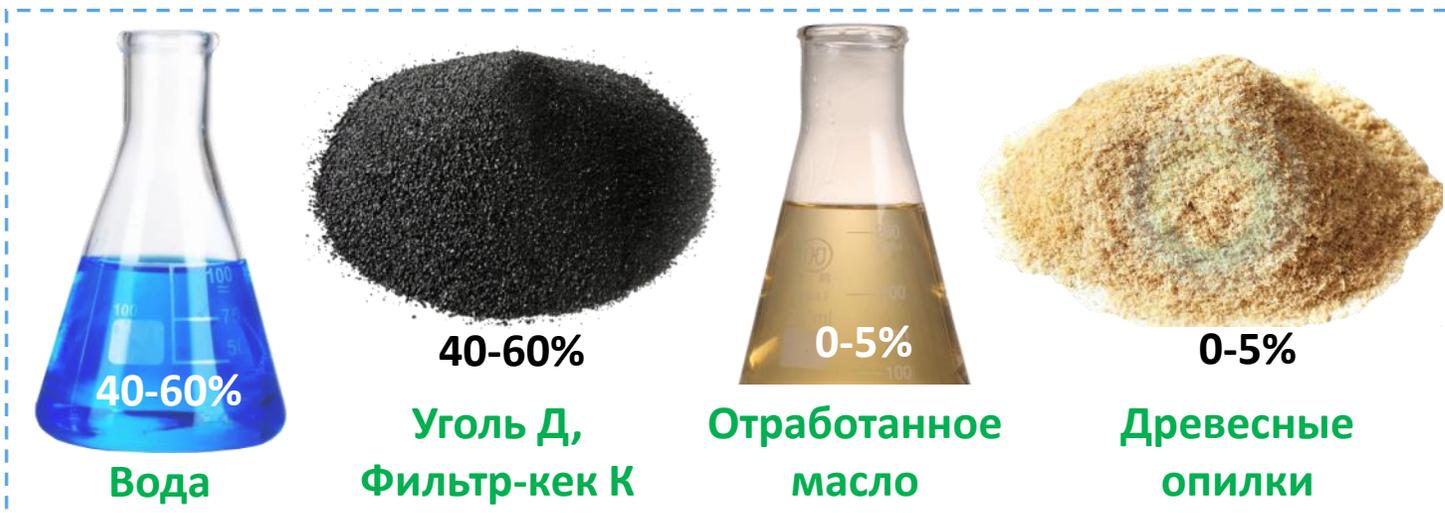


Табл. 1. Процентное соотношение компонентов исследованных ВУТ и ОВУТ

№	Вода	Уголь Д (80 мкм)	Уголь Д (100 мкм)	Уголь Д (120 мкм)	Уголь Д (140 мкм)	Фильтр-кек К (80 мкм)	Отработанное турбинное масло	Древесные опилки
1	50	50	-	-	-	-	-	-
2	50	-	-	50	-	-	-	-
3	50	-	-	-	50	-	-	-
4	50	-	25	-	25	-	-	-
5	40	-	-	-	-	60	-	-
6	50	-	-	-	-	50	-	-
7	60	-	-	-	-	40	-	-
8	45	-	-	-	-	50	5	-
9	55	-	-	-	-	40	-	5

### Варьируемые параметры:

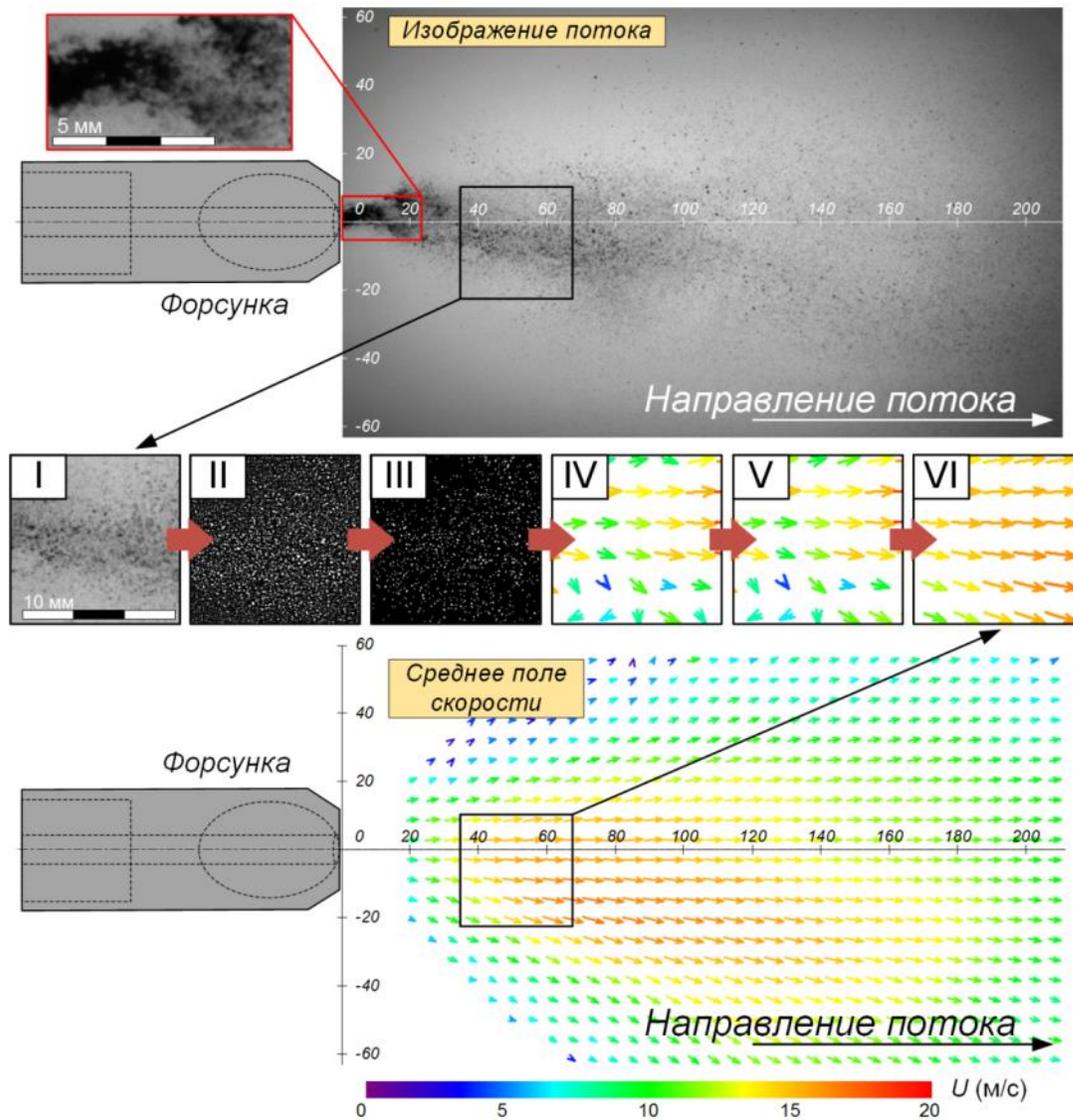
1. Состав и размер частиц исходного компонента;
2. Тип и концентрация компонентов ВУТ/ОВУТ;
3. Давление перед форсункой;
4. Соотношение «топливо-воздух»;
5. Механизмы первичного и вторичного распада капель при распыле;
6. Количество форсунок.

### Регистрируемые параметры:

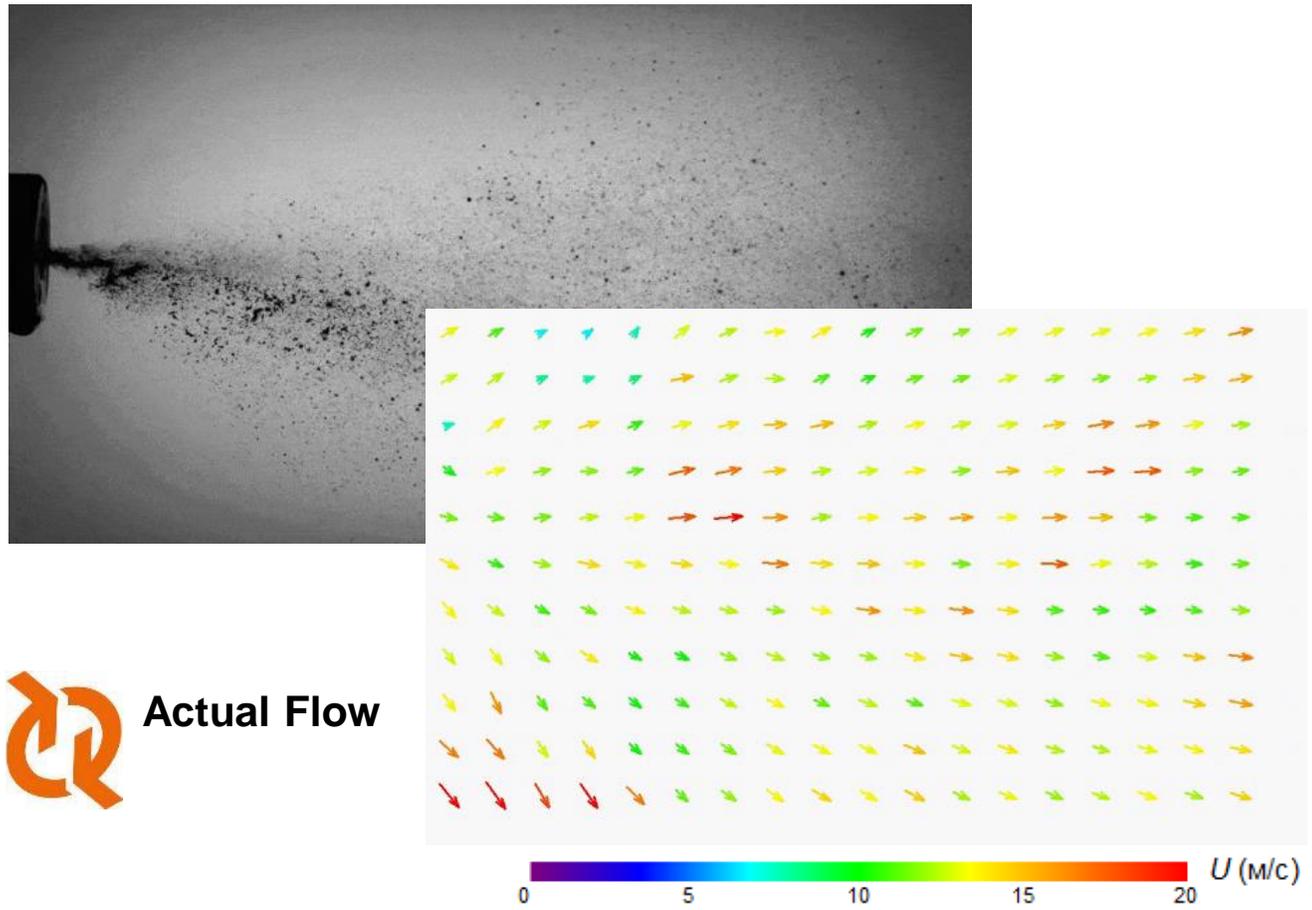
1. Скорость движения капель;
2. Размеры капель;
3. Объемная и количественная концентрация капель в струе;
4. Угол раскрытия струи (факела распыла);
5. Угол отклонения струи от оси симметрии распылительной форсунки.



## Скорость движения капель \*



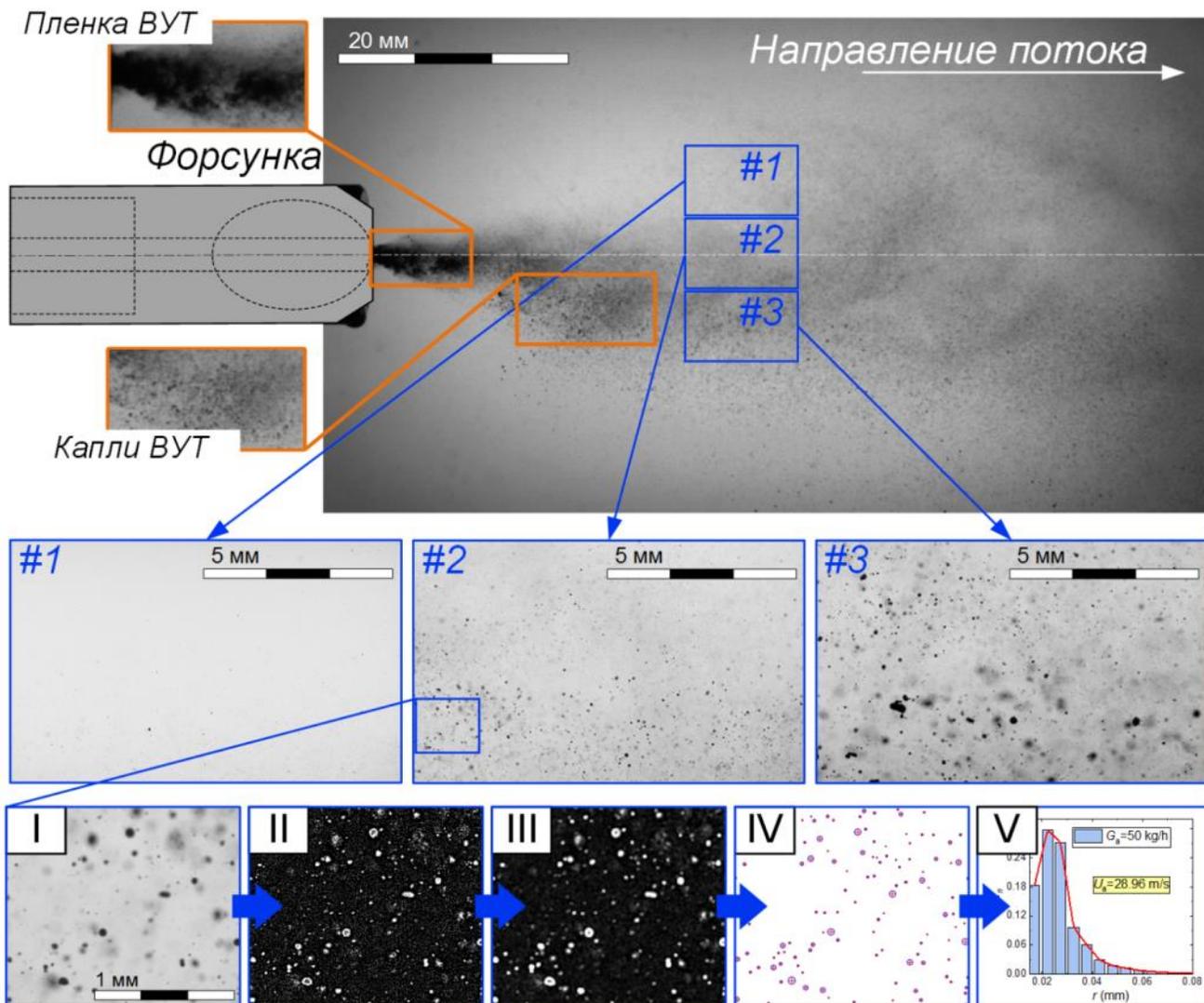
## “Particle Image Velocimetry” (PIV)



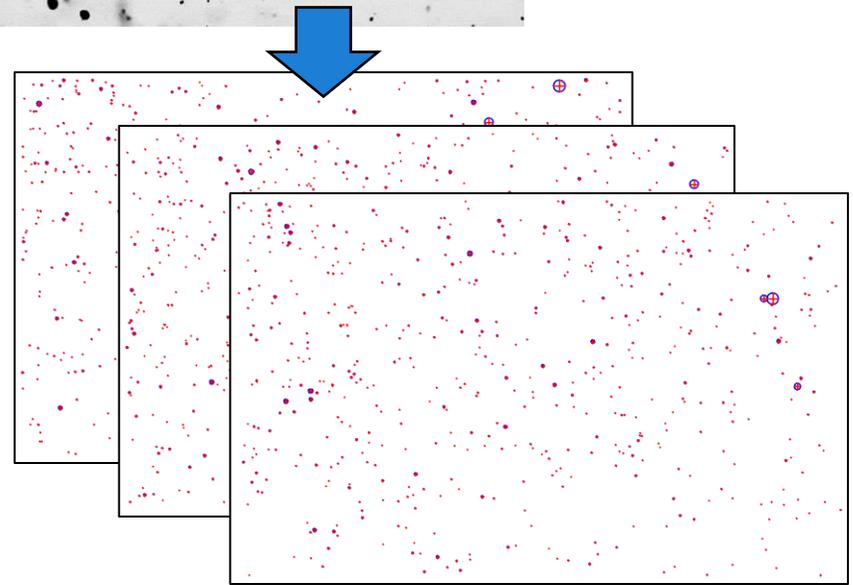
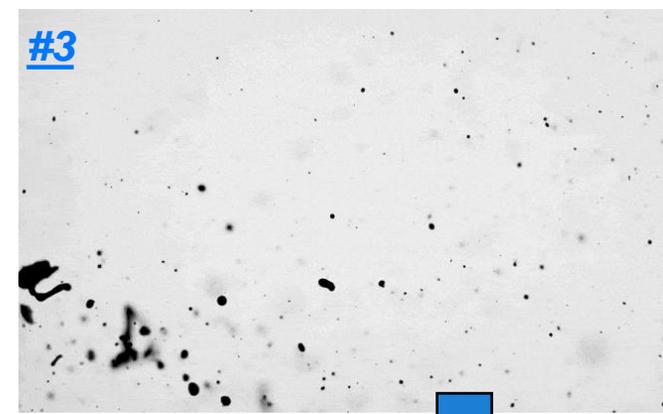
\* G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, T.R. Valiullin, R.S. Volkov, Atomization behavior of composite liquid fuels based on typical coal processing wastes, Fuel Processing Technology. 2022. V. 225, 107037.



## Размеры и концентрация капель \*



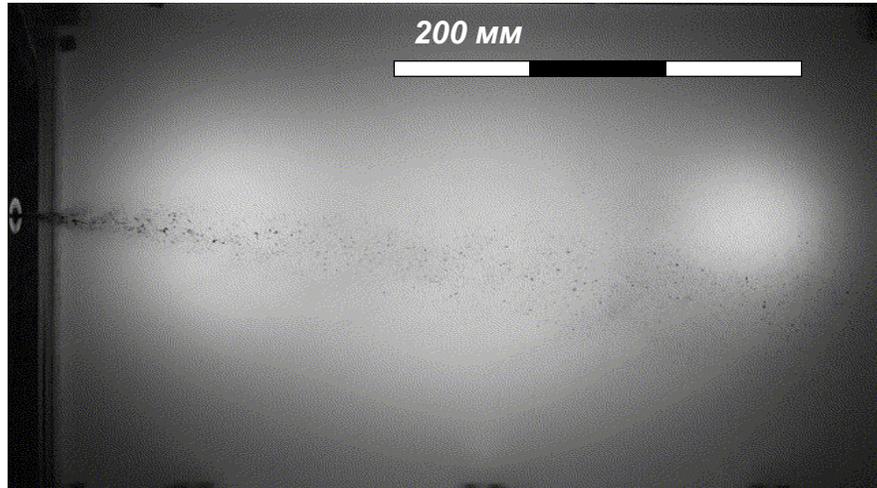
## "Shadow Photography" (SP)



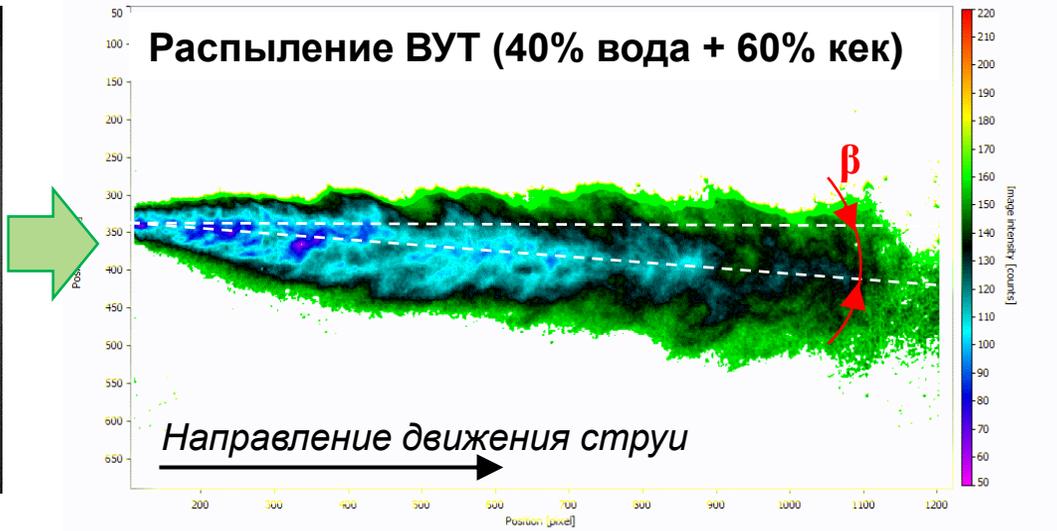
\* G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, T.R. Valiullin, R.S. Volkov, Atomization behavior of composite liquid fuels based on typical coal processing wastes, Fuel Processing Technology. 2022. V. 225, 107037.



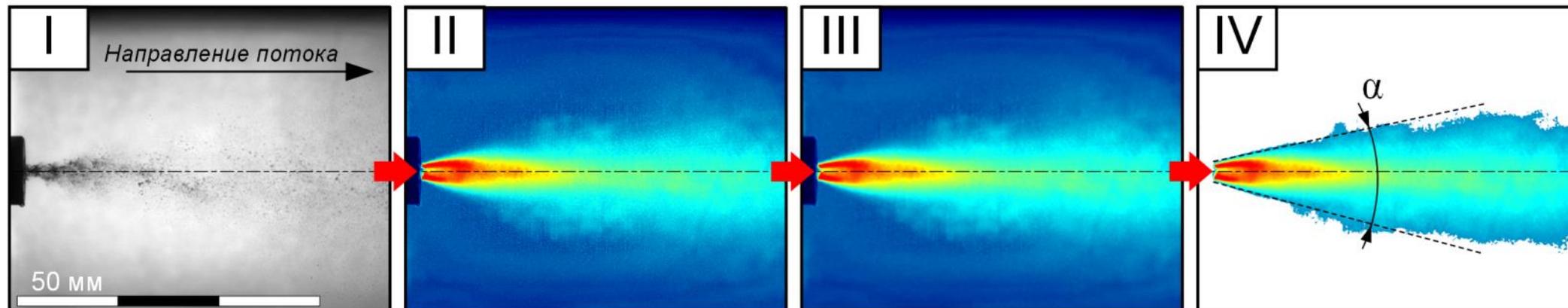
## Угол раскрытия и траектория струи \*



### Траектория движения струи

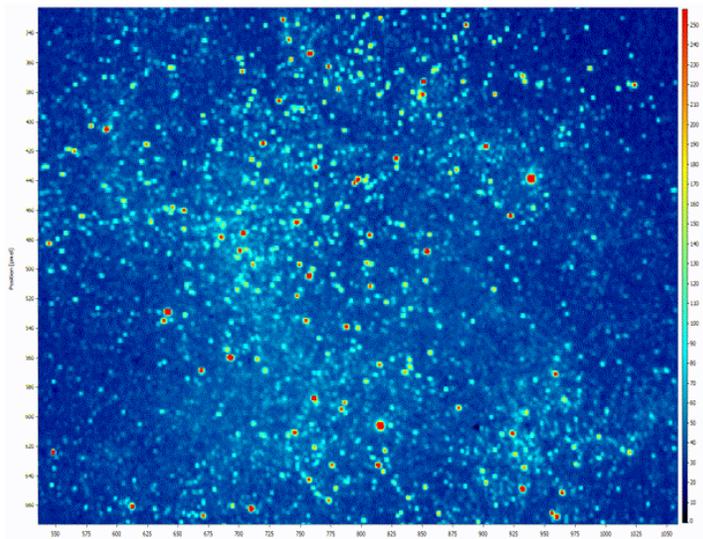


## Угол раскрытия струи

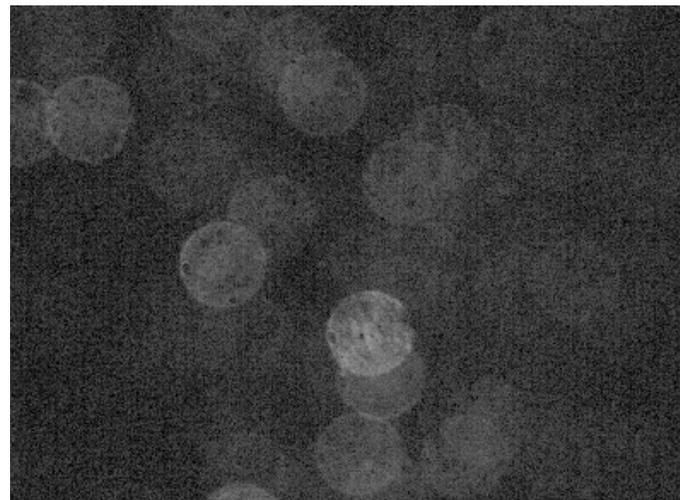


## Идентификация компонентов в струе распыленного суспензионного топлива \*

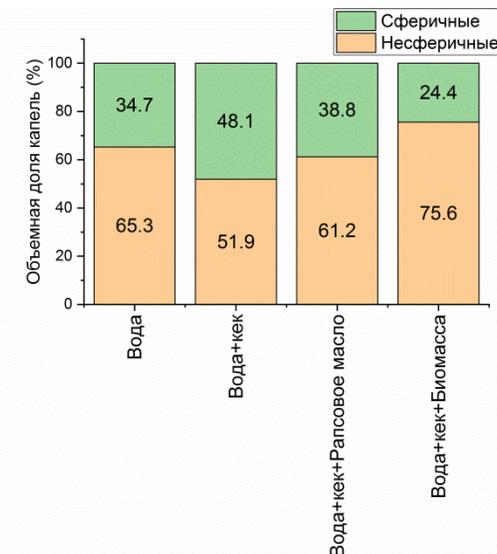
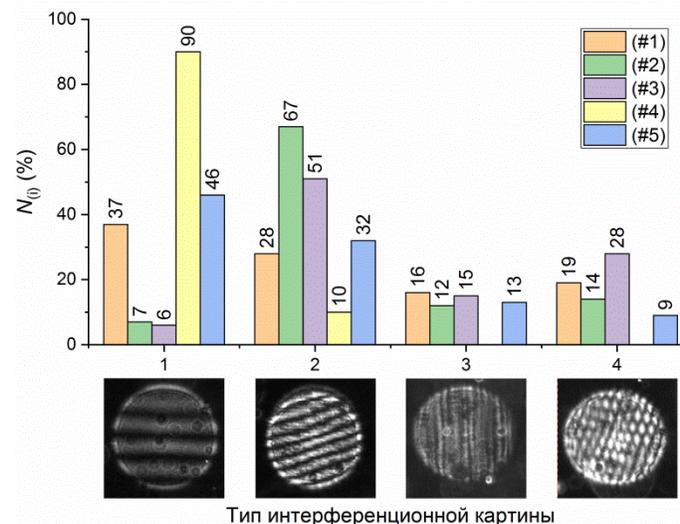
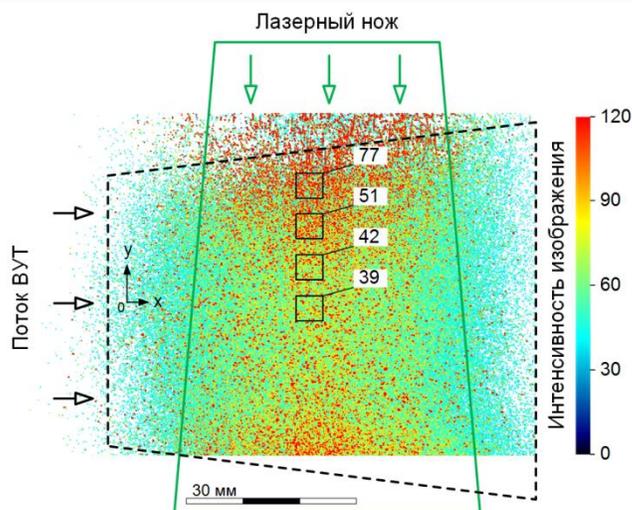
### Laser Induced Fluorescence (LIF)



### Interferometric Particle Imaging (IPI)



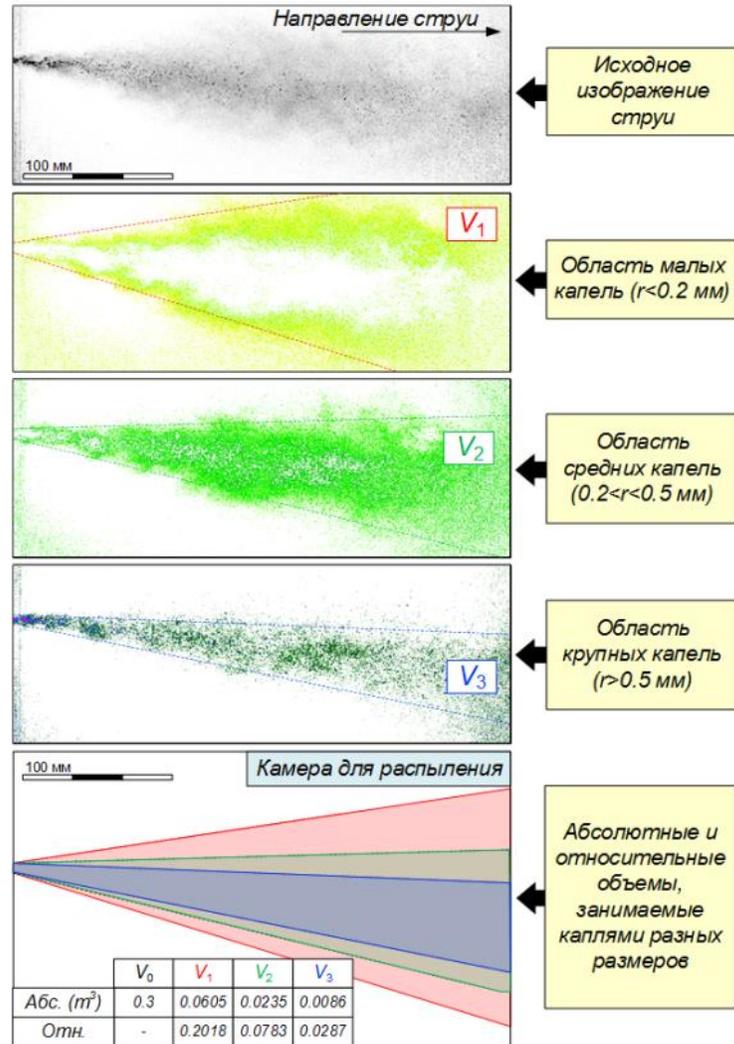
### Shadow Technique (SP)



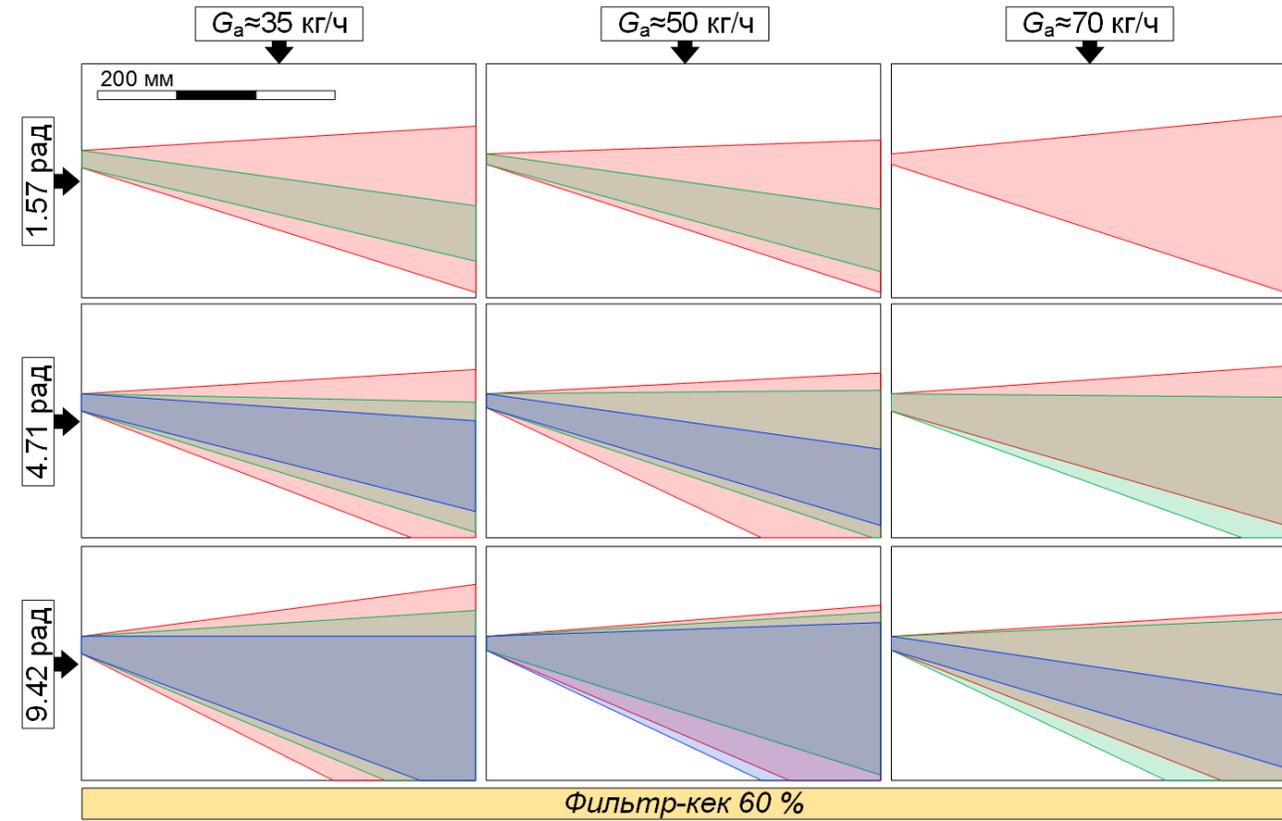
\* G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, T.R. Valiullin, R.S. Volkov, Atomization behavior of composite liquid fuels based on typical coal processing wastes, Fuel Processing Technology. 2022. V. 225, 107037.



# (I) Характеристики распыления композиционных жидких топлив на основе типичных отходов углеобогащения



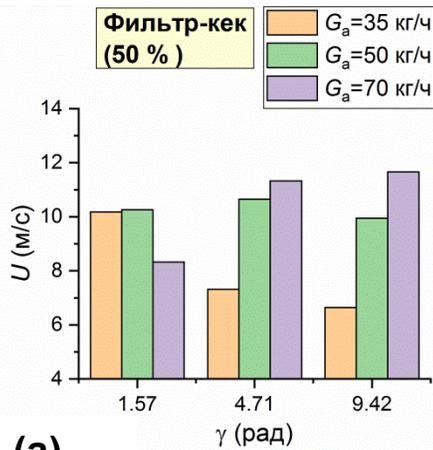
Мелким каплям соответствует максимальная интенсивность изображения \*



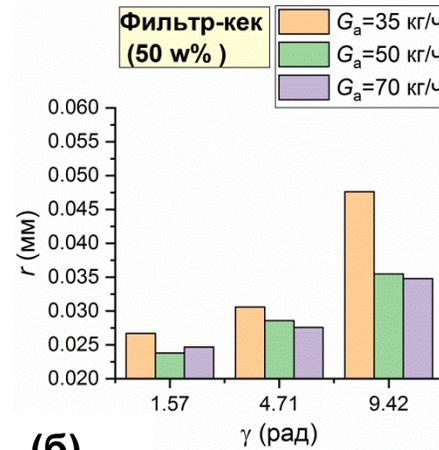
Области, занимаемые различными по размерам каплями (красный –  $R_d < 0.2$  мм; зеленый –  $0.2 < R_d < 0.5$  мм; синий –  $R_d > 0.5$  мм) суспензии, при различных расходах воздуха через распылительную форсунку, углах поворота распылительного устройства (60% кек, 40% вода)



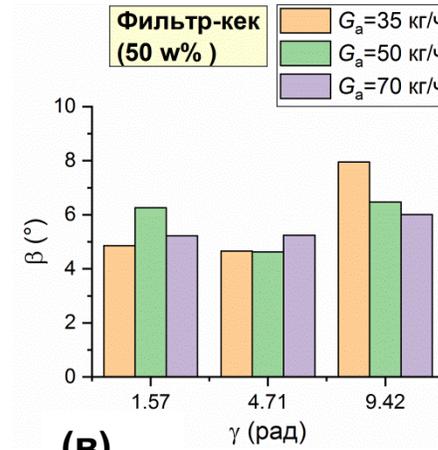
# (I) Характеристики распыления композиционных жидких топлив на основе типичных отходов углеобогащения



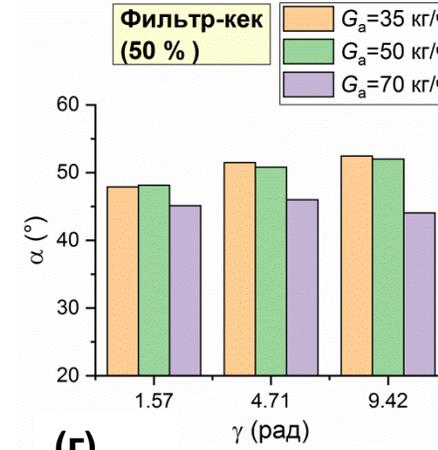
(а)



(б)



(в)



(г)

Средние значения характеристик распыления ВУТ \* (для состава 50% вода + 50% кек): (а) – скорости движения капель; (б) – радиусы капель; (в) – угол отклонения струи от оси симметрии форсунки; (г) – угол раскрытия струи

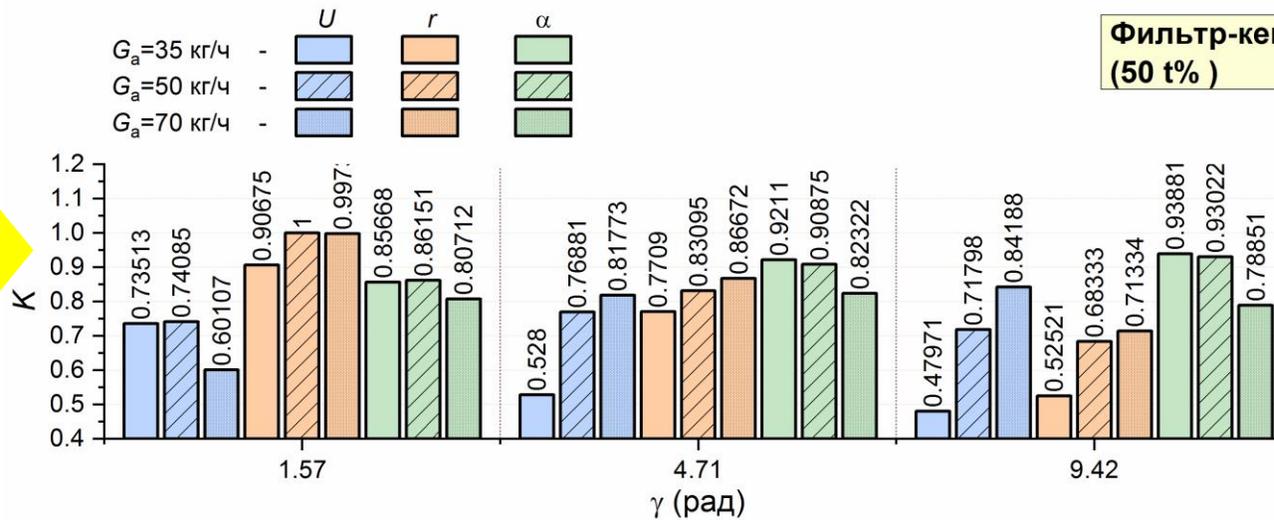
**Безразмерный интегральный критерий (K):**

$$K(r) = (r)^{\min}/r,$$

$$K(U) = U/(U)^{\max};$$

$$K(\alpha) = \alpha/(\alpha)^{\max},$$

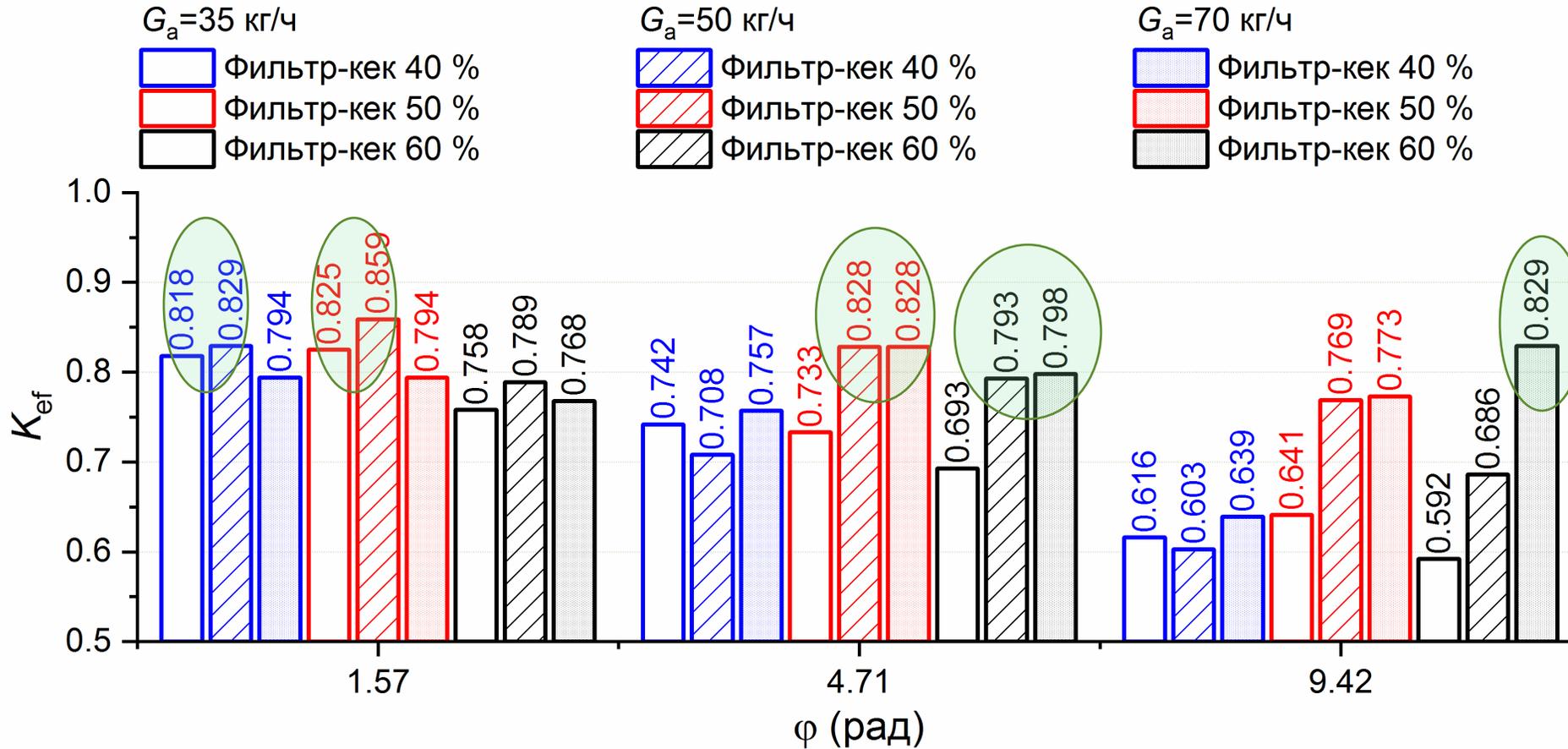
где  $(r)^{\min}$ ,  $(U)^{\max}$ ,  $(\alpha)^{\max}$  – минимальные и максимальные зарегистрированные значения характеристик



Карты параметров распыления ВУТ\* (для состава 50% вода + 50% кек) (интегральные параметры распыления для радиусов (r) капель, скоростей движения (U) капель и углов раскрытия (alpha) струи) при различном расходе воздуха через распылительную форсунку



# (I) Характеристики распыления композиционных жидких топлив на основе типичных отходов углеобогащения



$$K_{ef} = 0.33 \cdot K(r) + 0.33 \cdot K(U) + 0.33 \cdot K(\alpha)$$

$K(r)$ ,  $K(U)$ ,  $K(\alpha)$  – значения интегральных параметров распыления для радиусов ( $r$ ) капель, скоростей движения ( $U$ ) капель и углов раскрытия ( $\alpha$ ) струи

0.33 - значения весовых коэффициентов

Значения **коэффициента эффективности распыления** во всем диапазоне исследованных параметров распыления ( $\varphi=1.57-9.42$ ;  $G_a=35-70$  кг/ч) при различной концентрации кека в суспензии (40-60 %) \*



## Основные выводы:\*

- Исследованы скорости движения и размеры капель топливных суспензий, угол раскрытия струи, угол отклонения струи от оси симметрии форсунки;
- Предложен **относительный коэффициент эффективности распыления** суспензий с учетом размеров, скорости и траекторий движения капель;
- Увеличение **концентрации кека** в суспензии в диапазоне 40–60 wt% приводит к **росту средних скоростей движения струи на 14–19%**;
- Увеличение **концентрации кека** в суспензии в диапазоне 40–60 wt% способствует **росту среднего размера капель на 5–7%**;
- Для суспензий с концентрацией кека 50–60 wt% регистрировалась симметрия структуры струи: **крупные капли расположены в центре струи, мелкие – на ее периферии**;
- В результате применения LIF метода установлено, что **капли с минимальной концентрацией кека находятся на периферии потока, а с максимальной, наоборот, движутся в его центре**.



# (II) Влияние примеси жидкого горючего компонента и древесной биомассы в составе суспензионных топлив на характеристики их распыления



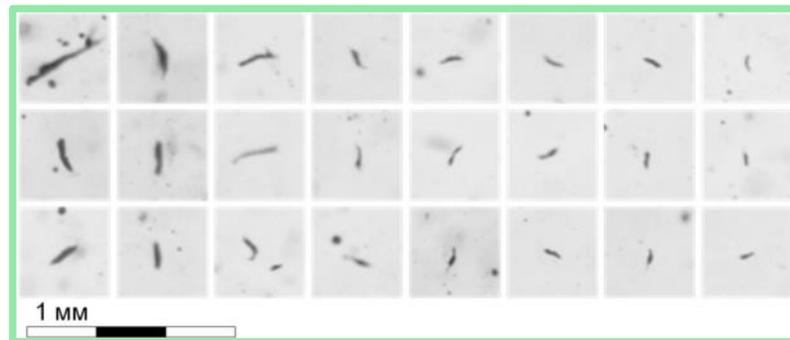
**Состав #1**  
 кек – 50 %, вода – 50 % (ВУТ)



**Состав #2**  
 кек – 50 %, вода – 50 %, трансформаторное масло – 5 % (ОВУТ)

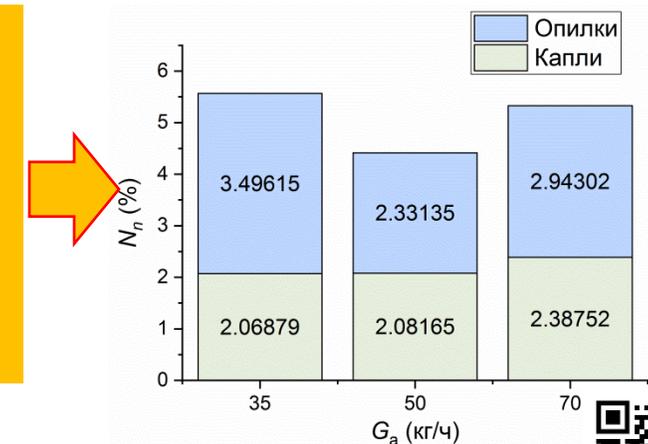


**Состав #3**  
 кек – 40 %, древесные опилки – 5 %, вода – 55 % (ОВУТ)



В общем потоке капле зарегистрировались отдельные фрагменты биомассы (не менее половины всей добавленной биомассы в суспензию отделяется от основного потока топлива при распылении) \*

Суммарный процент несферичных капле, а также частиц древесной биомассы (опилок) в струе

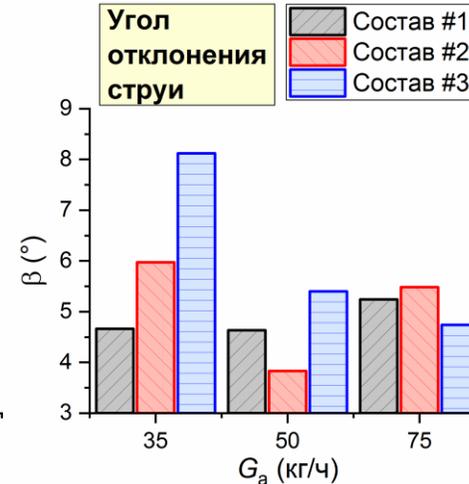
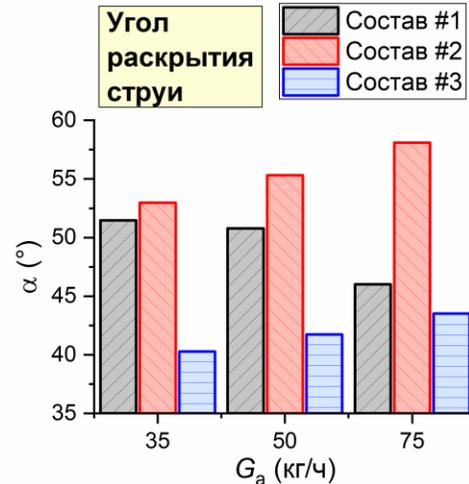
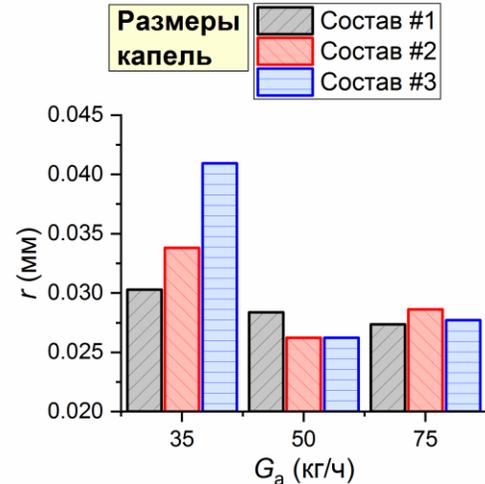
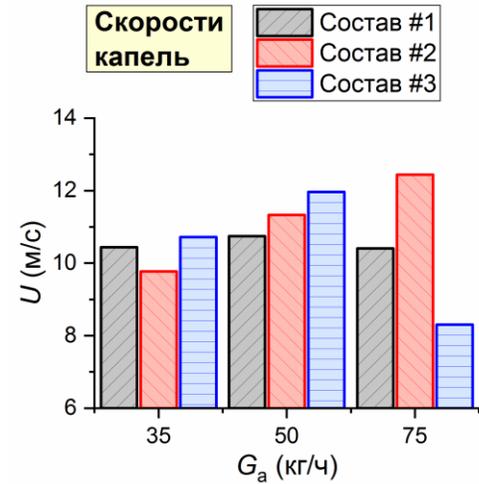


\* G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, T.R. Valiullin, R.S. Volkov, Atomization behavior of composite liquid fuels based on typical coal processing wastes, Fuel Processing Technology. 2022. V. 225, 107037.



# (II) Влияние примеси жидкого горючего компонента и древесной биомассы в составе суспензионных топлив на характеристики их

## распыления



### Составы:

(#1) кек – 50 %, вода – 50 %

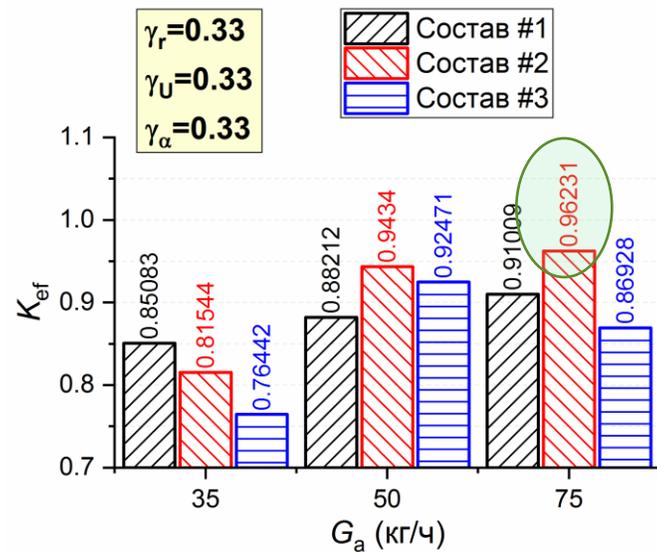
(ВУТ);

(#2) кек – 50 %, вода – 50 %, трансформаторное масло – 5 %

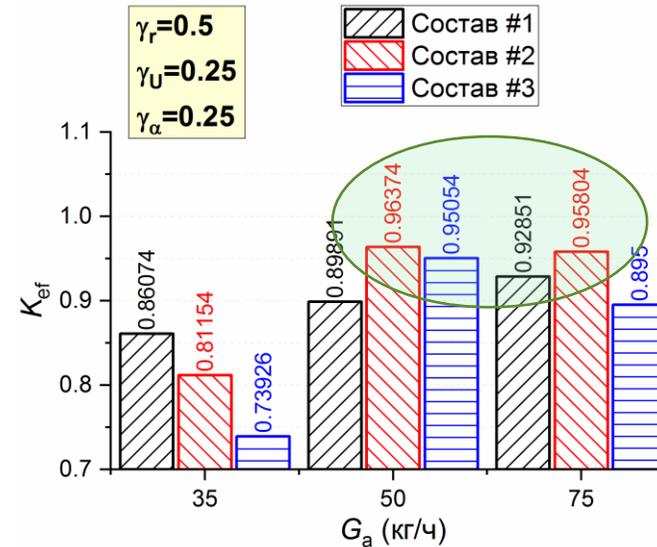
(ОВУТ);

(#3) кек – 40 %, древесные опилки – 5 %, вода – 55 %

(ОВУТ).



Кoeffициент эффективности распыления \*



## (II) Влияние примеси жидкого горючего компонента и древесной биомассы в составе суспензионных топлив на характеристики их распыления

### Основные выводы:\*

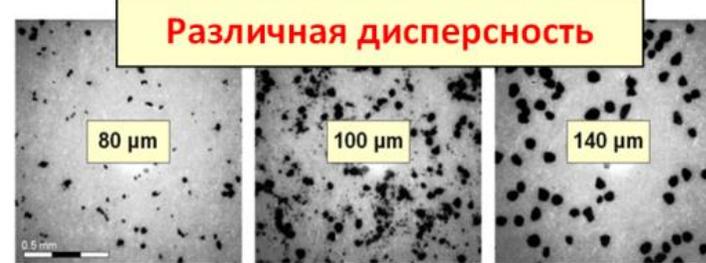
- Добавление турбинного масла (5%) в ВУТ привело к **росту скорости движения капель на 9-11%**;
- При  $G_a \approx 35$  кг/ч добавление примеси жидкого горючего компонента (5%) и древесной биомассы (5%) в ВУТ способствовало **росту среднего размера капель на 10-12%**;
- Добавление турбинного масла (5%) и древесных опилок (5%) в состав ВУТ привело к **снижению концентрации мелких ( $r < 0.04$  мм) капель на 2–9%**;
- Более 50% **частиц биомассы**, добавленных в ВУТ, при распылении **движутся в струе в виде отдельных фрагментов**;
- Добавление турбинного масла (5%) в ВУТ приводит к **росту угла раскрытия струи на 4°**, а древесных опилок (5%), напротив, – к **снижению на 3°**;
- В результате применения SP метода установлено, что **не менее 23% всего объема капель в распыленном потоке суспензии содержат в своем составе биомассу (древесные опилки)**.



# (III) Влияние размеров частиц угля в составе композиционного жидкого топлива на характеристики его распыления



- #1: Вода 50 % + Уголь (80 мкм) 50 %
- #2: Вода 50 % + Уголь (100 мкм) 50 %
- #3: Вода 50 % + Уголь (140 мкм) 50 %
- #4: Вода 50 % + Уголь (140 мкм) 25 % + Уголь (100 мкм) 25 %

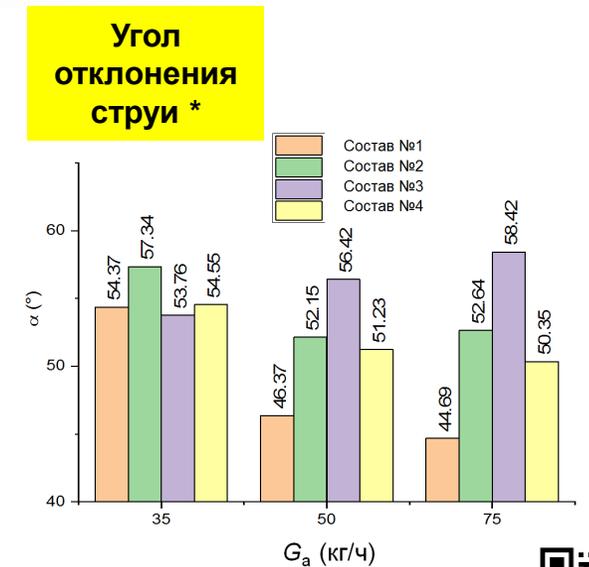
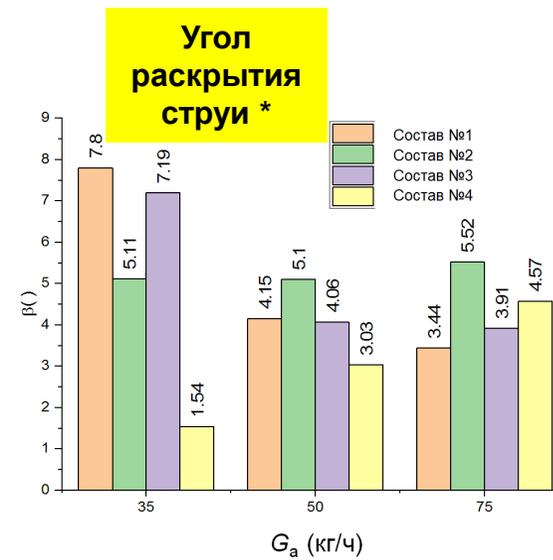
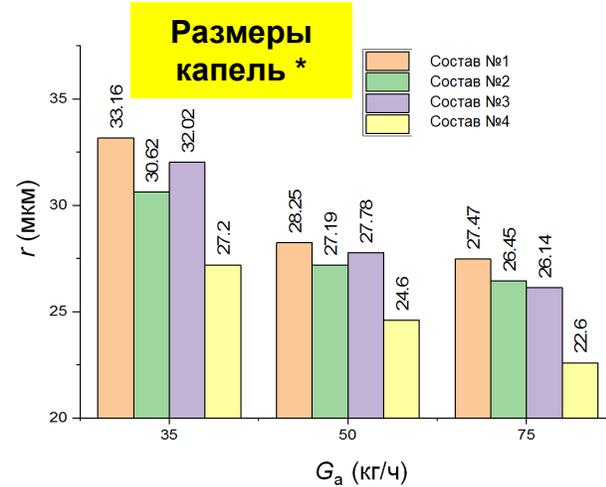
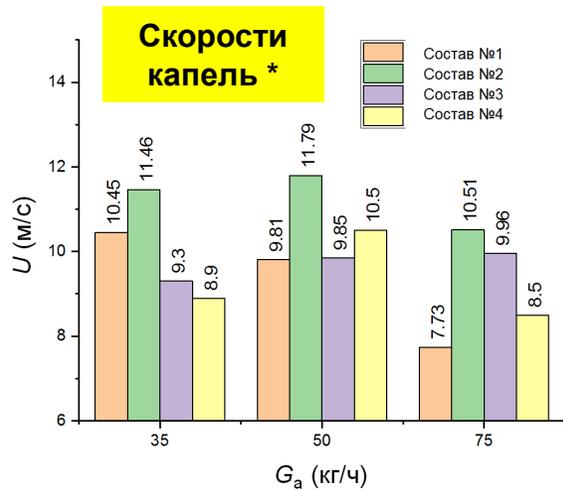


Различная дисперсность

80 μm

100 μm

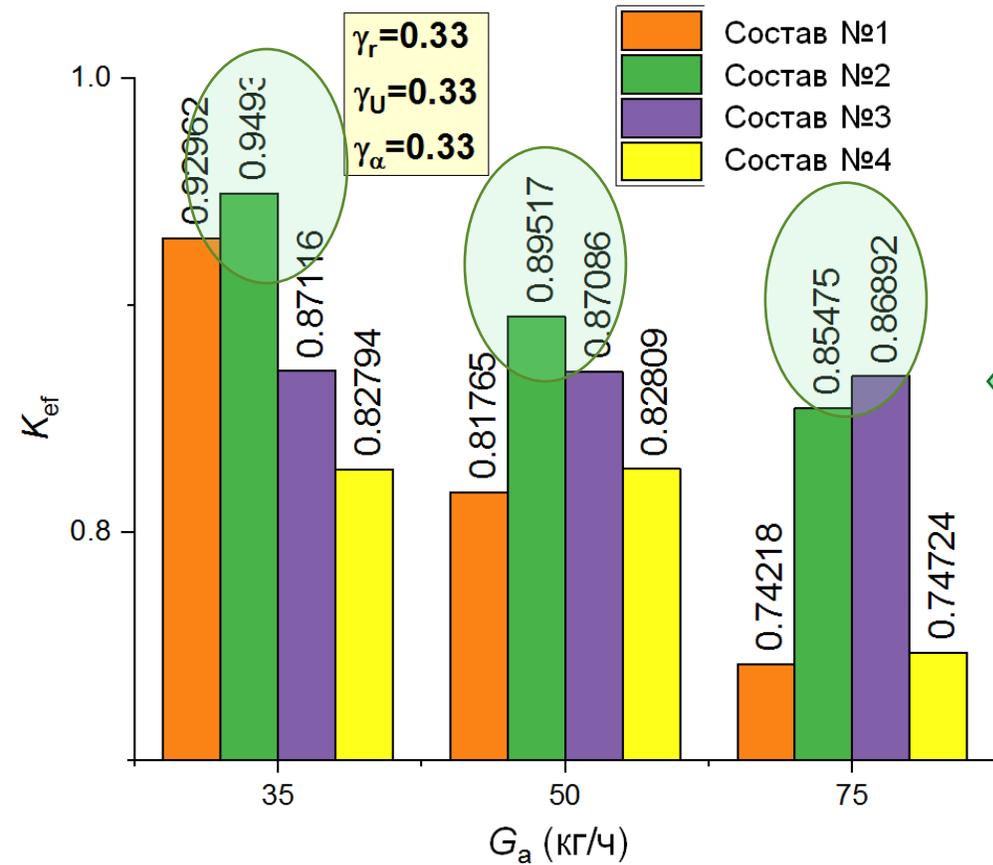
140 μm



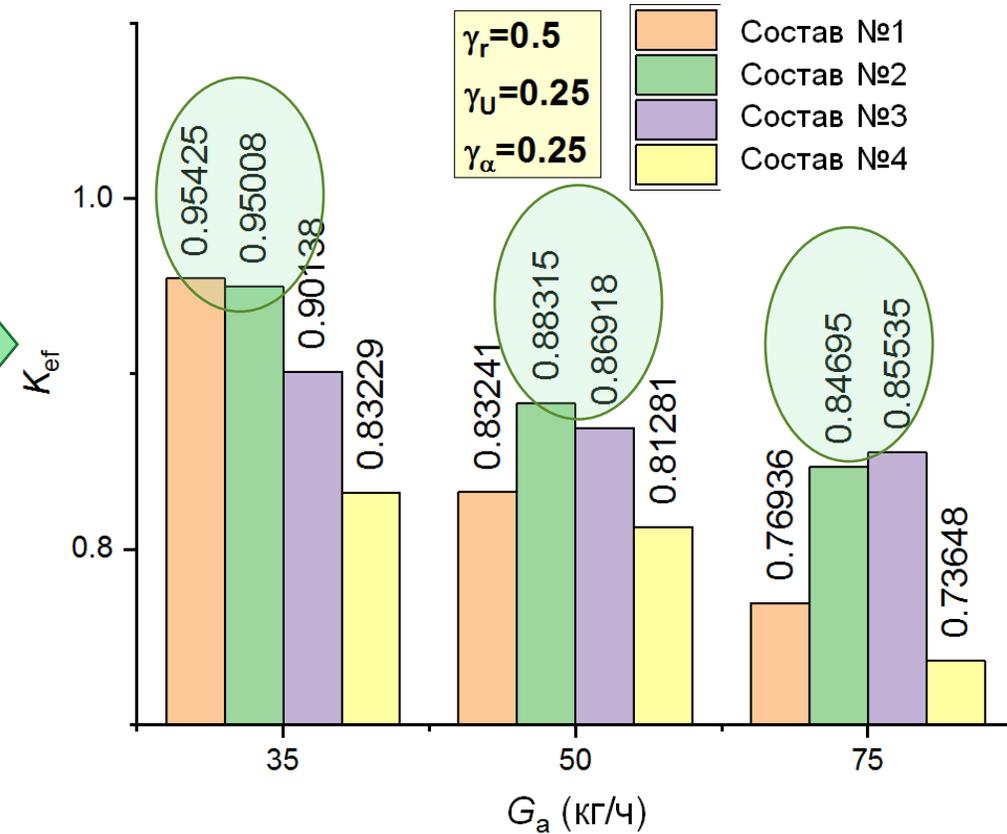
\* G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, T.R. Valiullin, R.S. Volkov, Atomization behavior of composite liquid fuels based on typical coal processing wastes, Fuel Processing Technology. 2022. V. 225, 107037.



### (III) Влияние размеров частиц угля в составе композиционного жидкого топлива на характеристики его распыления



Кoeffициент эффективности распыления \*



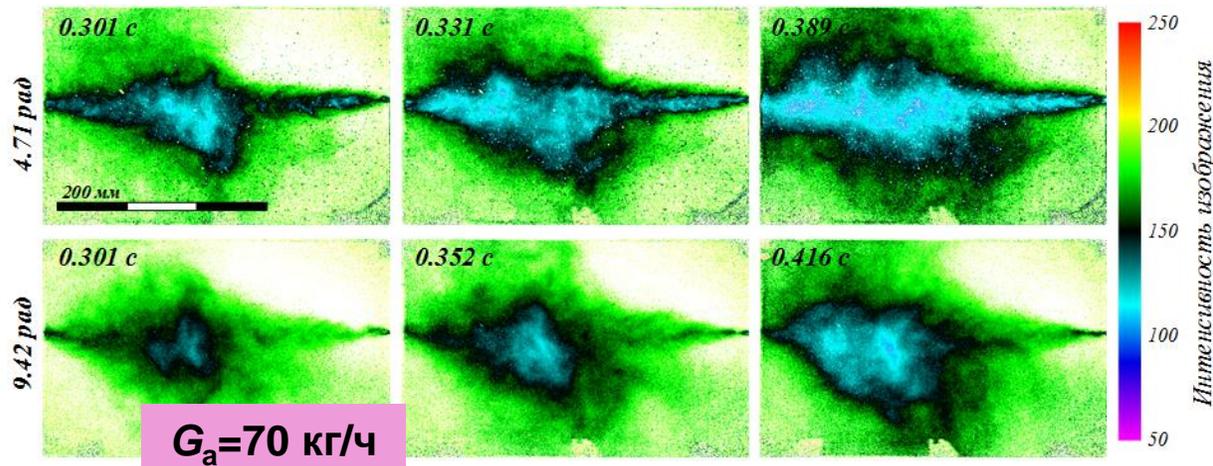
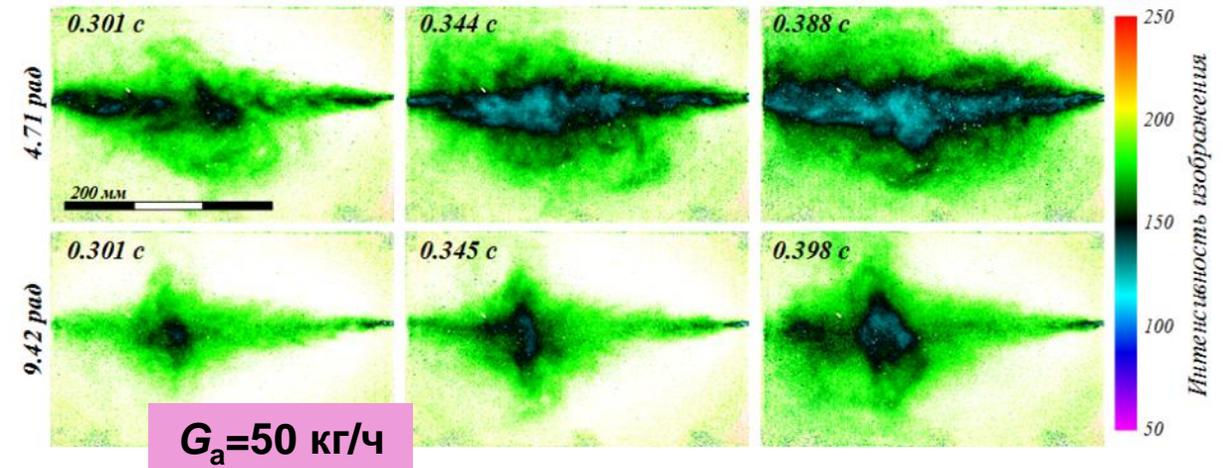
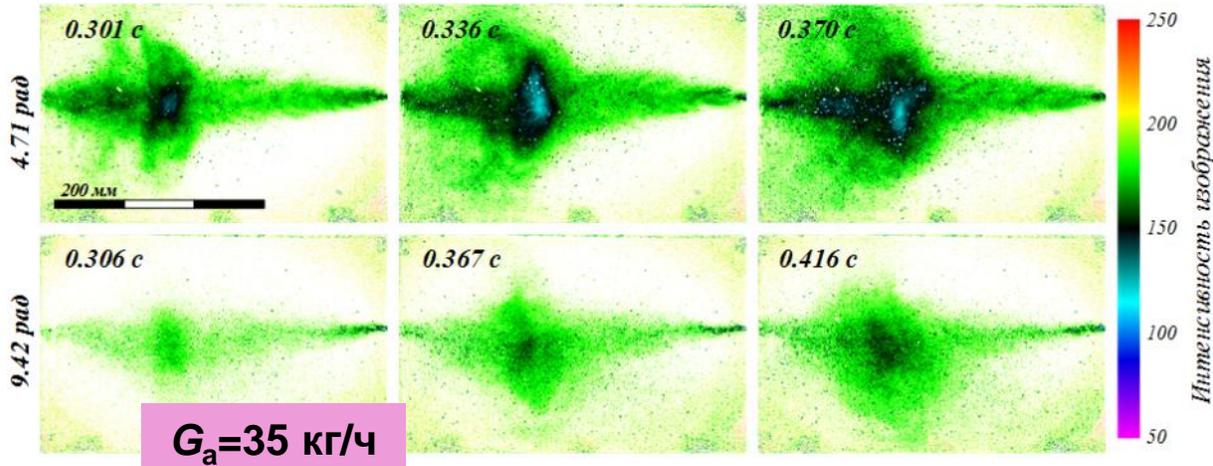
#### Основные выводы:\*

- Повышение расхода воздуха **увеличивает скорость движения капель с крупными частицами угля** и уменьшает аналогичные характеристики для капель, содержащих мелкие частицы;
- Повышение расхода воздуха приводит **к уменьшению среднего радиуса капель суспензий** при всех использованных размерах частиц угля;
- При расходе воздуха более 50 кг/ч **увеличение размера частиц в топливной суспензии практически не влияет на значения угла отклонения струи** от оси симметрии форсунки;
- Вычислены значения коэффициента эффективности распыления суспензий с учетом скоростей и размеров топливных фрагментов, угла раскрытия струи и ее отклонения от оси симметрии;
- **Коэффициент эффективности распыления суспензий с отходом углеобогащения увеличивается с ростом массового расхода воздуха, а для составов с частицами угля, наоборот, снижается.**



# (IV) Управление характеристиками распыления композиционных топлив при использовании двух форсунок

Рост расхода воздуха интенсифицирует смешение струй ВУТ \*



Вода 50% +  
кек К 50%

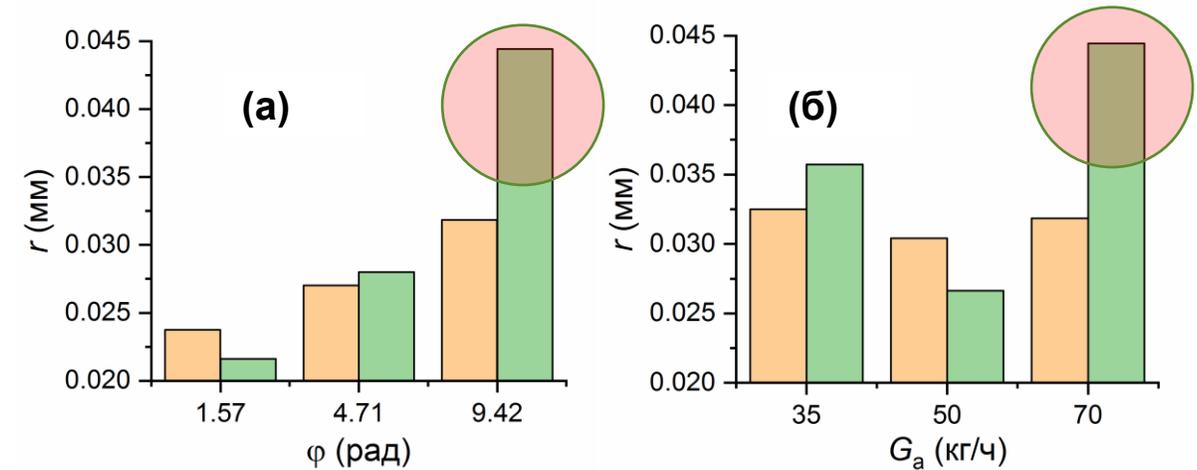
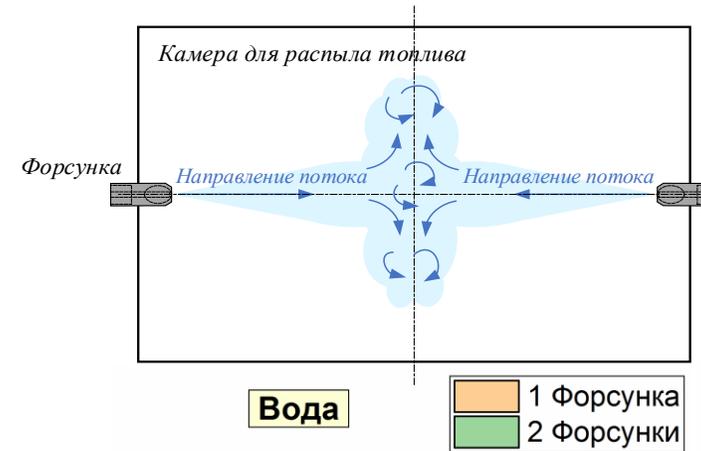
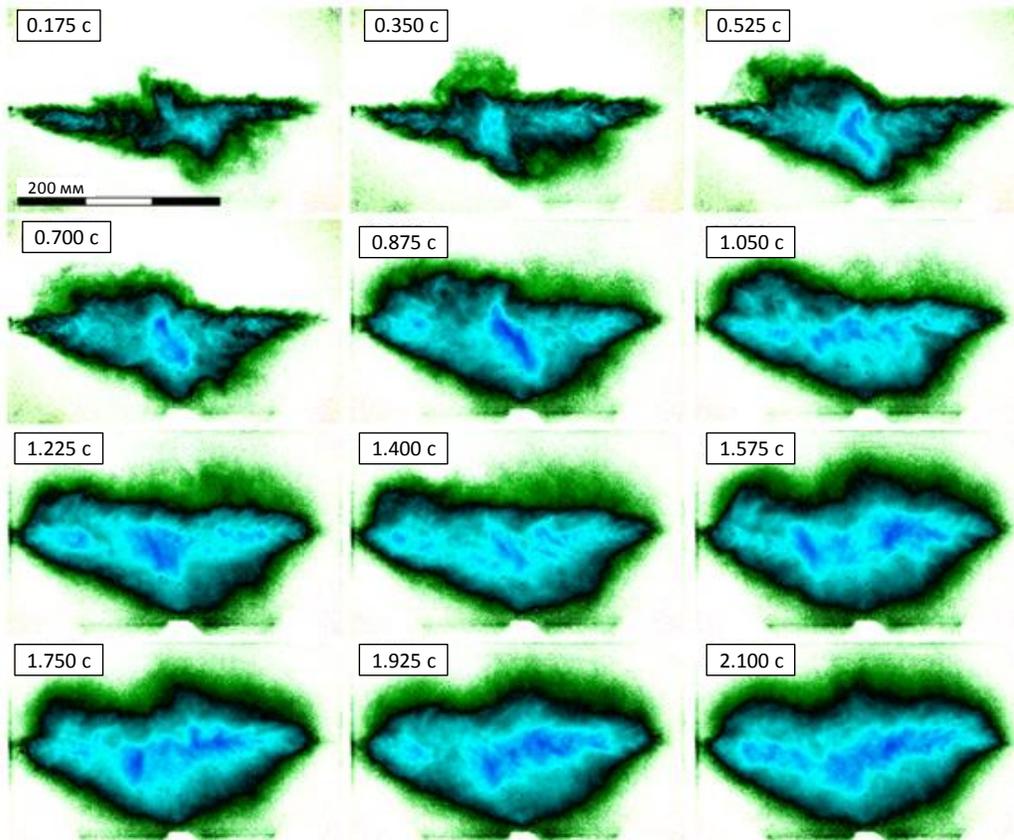
Форсунка  
№1

Форсунка  
№2



# (IV) Управление характеристиками распыления композиционных топлив при использовании двух форсунок

Траектории капель при распылении двумя встречными форсунками (под углом  $0^\circ$ ) воды без примесей при угле поворота устройства  $1.57$  рад (массовый расход воздуха  $50$  кг/ч) \*

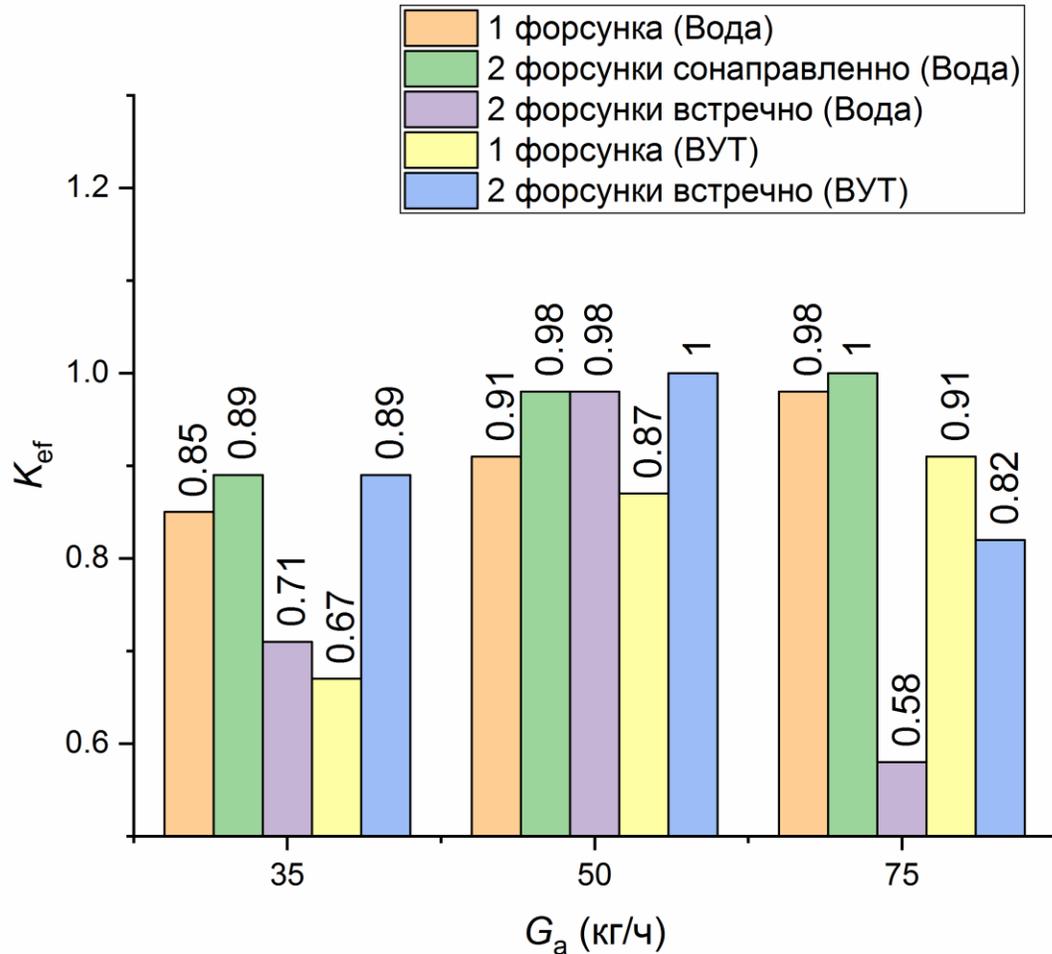


Значения среднего радиуса капель при варьировании угла поворота форсуночного устройства (а) (при  $G_a \approx 70$  кг/ч) и массового расхода воздуха (б) (при  $\phi \approx 9.42$  рад) при распылении одной и двумя встречно направленными форсунками (под углом  $0^\circ$ ) \*

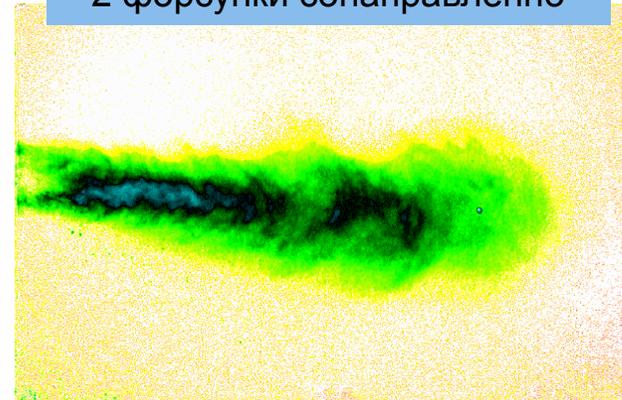


# (IV) Управление характеристиками распыления композиционных топлив при использовании двух форсунок

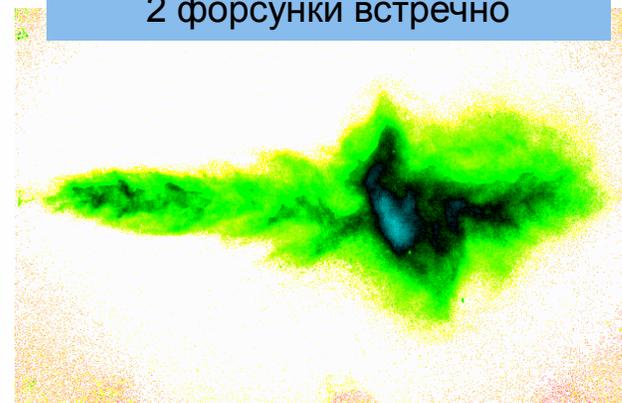
Коэффициент  
эффективности распыления



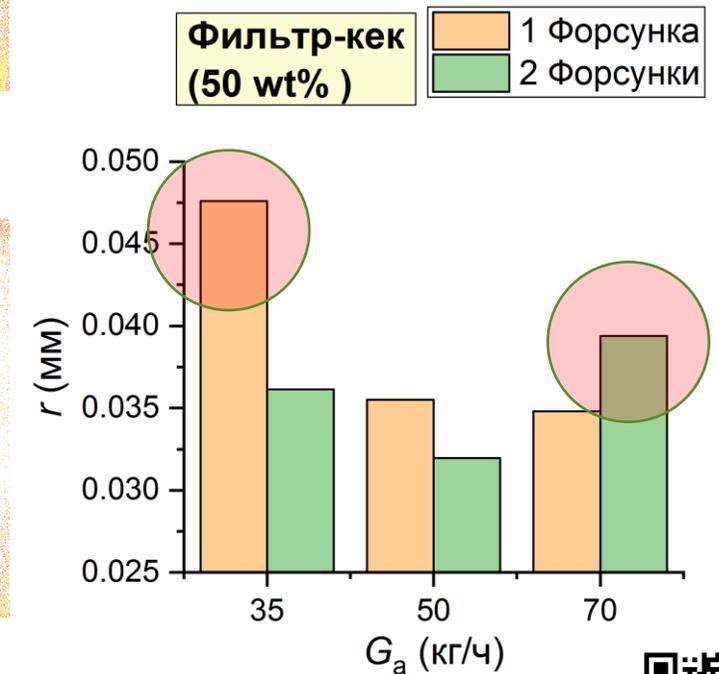
2 форсунки сонаправленно



2 форсунки встречно



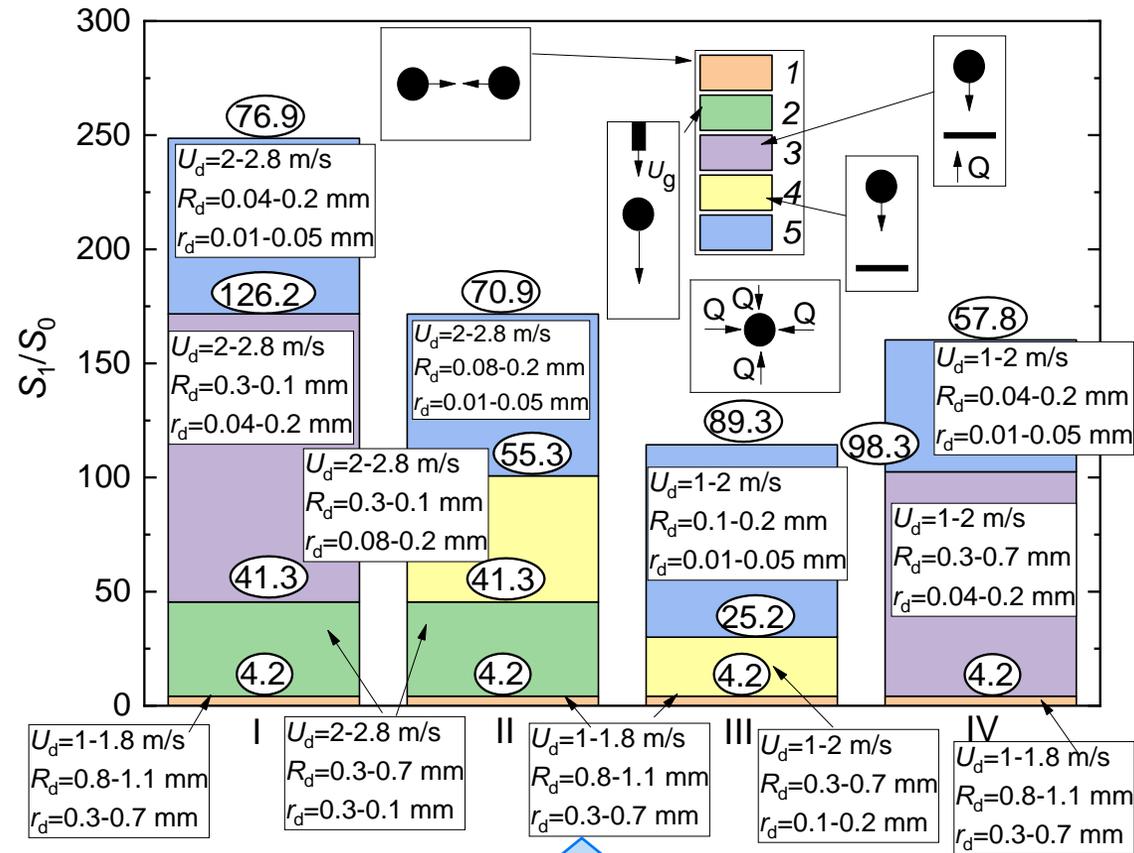
Значения среднего радиуса капель ВУТ (50% кек, 50 % вода) при  $\varphi \approx 9.42$  rad при варьировании массового расхода воздуха через форсунку при распылении одной и двумя встречно направленными форсунками (под углом  $0^\circ$ ).



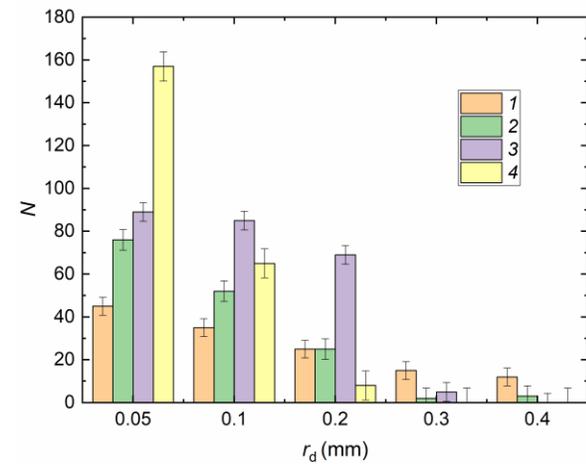
### Основные выводы [1, 2]:

- Выполнено **сравнение характеристик распыления** композиционных жидких топлив **одной форсункой и двумя форсунками** с разными схемами взаимного расположения;
- **Размеры капель** композиционных жидких топлив **можно регулировать** в результате реализации определенных **режимов взаимодействия двух струй**;
- Установлены количество, размеры, скорости и траектории движения капель, угол раскрытия и отклонения распыленной струи от оси симметрии для типичных условий распыления топлива;
- По результатам сопоставления характеристик распыления воды, жидких композиционных топлив на основе углей и отходов углеобогащения **показана возможность прогнозирования** этих **характеристик для топлив** (распределения капель по размерам) по экспериментальным данным для воды;
- Предложены **схемы**, при которых может быть **обеспечено максимальное значение относительного коэффициента эффективности распыления** с целью минимального размера вторичных фрагментов.



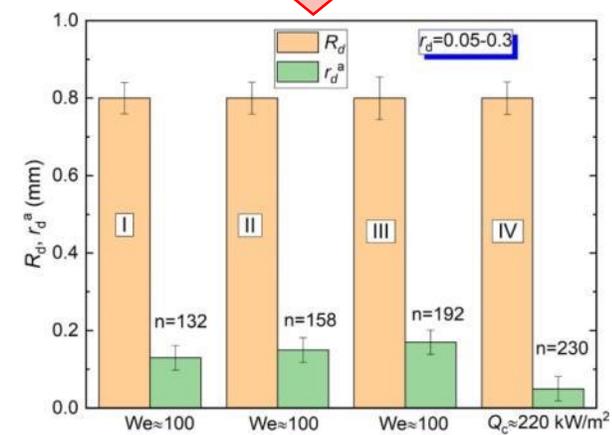


Максимальные отношения площадей поверхности жидкости после и до измельчения при комбинированном применении нескольких из четырех схем измельчения на примере капель эмульсии 90% дизельного топлива: 1 – соударения между собой; 2 – взаимодействие с натекающим потоком воздуха; 3 – соударение с нагретой стенкой; 4 – соударение со стенкой без нагрева; 5 – микро-взрывное измельчение \*



Типичные распределения капель по размерам в аэрозольном облаке после измельчения при применении каждой из четырех схем измельчения (для эмульсии 10% трансформаторного масла): при соударении между собой (1); за счет взаимодействия с твердой поверхностью (2); при натекании потока воздуха (3); микро-взрывное разрушение (4) для  $We=100$  \*

Размеры образующихся фрагментов (в сравнении с исходными каплями) при применении каждой из четырех схем измельчения капель эмульсии 90% дизельного топлива: при соударении между собой (I); за счет взаимодействия с твердой поверхностью (II); при натекании воздушной струи (III); микро-взрывное разрушение капель за счет интенсивного нагрева (IV) \*



\* N.E. Shlegel, P.A. Strizhak, D. Tarlet, J. Bellettre, Comparing the integral characteristics of secondary droplet atomization under different situations, International Communications in Heat and Mass Transfer. 2019. V. 108, 1004329.

### Основные выводы:\*

- Условия отскока, коагуляции, дробления и фрагментации сталкивающихся капель можно регистрировать достоверно при варьировании характеристик аэрозолей и газов в широких диапазонах, соответствующих энергетическим установкам;
- Увеличение вязкости жидких и композиционных топлив (от 0.001 до 0.0063 Па·с) приводит к смещению границ дробления и разлета в сторону больших чисел Вебера ( $We \approx 153$  и  $We \approx 58$ , соответственно) и снижению количества вторичных фрагментов с радиусом менее 0.15 мм практически на 40%. Снижение поверхностного натяжения (от 0.07269 до 0.036 Н/м) топлив приводит уменьшению критических (переходных между режимами) чисел Вебера для дробления и разлета на 67% и 63%, соответственно, и к росту отношения площадей свободной поверхности капель практически на 20%;
- Наиболее перспективная комбинация схем вторичного измельчения капель для получения мелкодисперсного аэрозоля представляет собой соударения между собой капель или со стенкой, а затем нагрев образующихся жидкостных фрагментов до состояния вскипания и последующего микро-взрывного разрушения. При такой комбинации обеспечивается рост отношения  $S_1/S_0$  более чем в 100 раз.



Благодарим за внимание!

 634050, г. Томск, улица Усова, д. 7, ауд. 263

 тел.: (+7 3822) 701-777 доп. 1910

 pavelspa@tpu.ru

 <http://hmtslab.tpu.ru>



Heat Mass Transfer  
Laboratory

TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

