

СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ВЕРТОЛЕТНОЙ ИНДУСТРИИ В НОВЫХ РЕАЛИЯХ

9 ноября 2022, Москва

Перспективы использования микро-взрыва в вертолетных технологиях

Автор доклада (Антонов Дмитрий Владимирович, к.ф.-м.н., доцент)

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Организатор



При поддержке



Генеральный спонсор



Устроитель





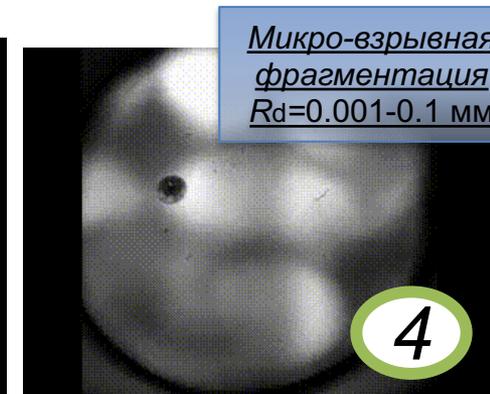
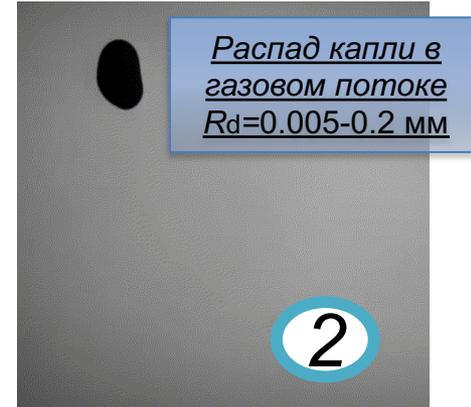
СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ВЕРТОЛЕТНОЙ ИНДУСТРИИ В НОВЫХ РЕАЛИЯХ

9 ноября 2022, Москва

Первичное измельчение



Вторичное измельчение

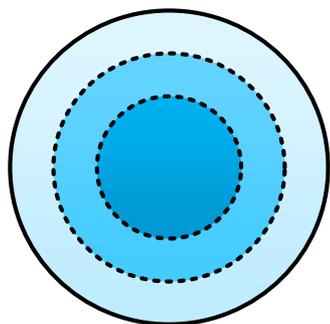


D.V. Antonov, N.E. Shlegel, P.A. Strizhak, D. Tarlet, J. Bellettre, Energy analysis of secondary droplet atomization schemes, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2020. V. 116. P. 104666.

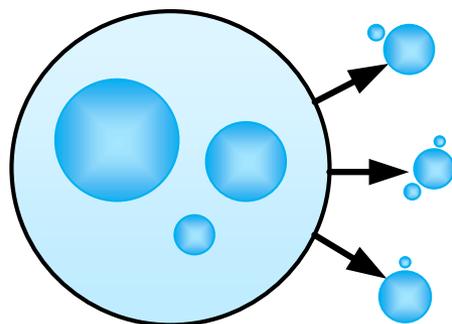
N. Shlegel, P. Strizhak, D. Tarlet, J. Bellettre, Comparing the integral characteristics of secondary droplet atomization under different situations, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2019. V. 108. P. 104329.



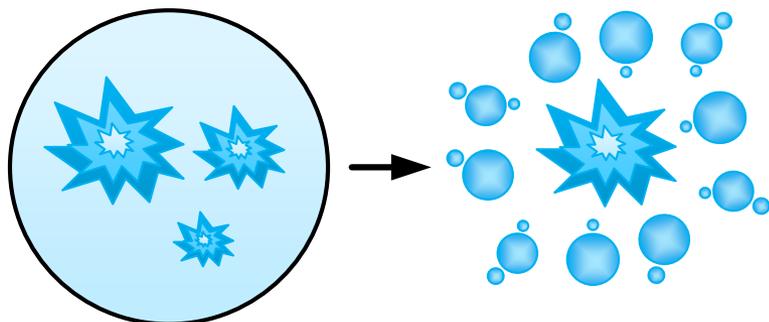
Микро-взрывной распад (micro-explosion) – процесс, при котором исходные двухжидкостные капли (*parent droplets*) распадаются на более мелкие вторичные фрагменты (*child droplets*) вследствие локального вскипания дисперсной фазы (воды).



Монотонное испарение
(*evaporation*)



Частичное диспергирование
(*puffing*)



Микро-взрыв (micro-explosion)

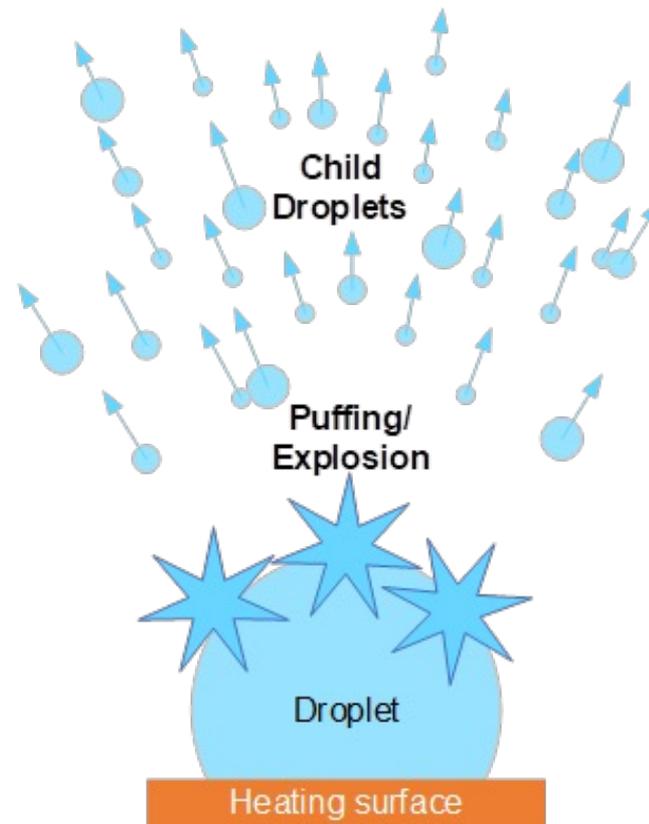
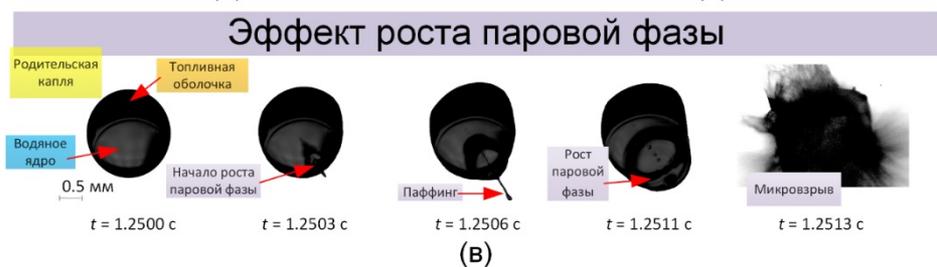
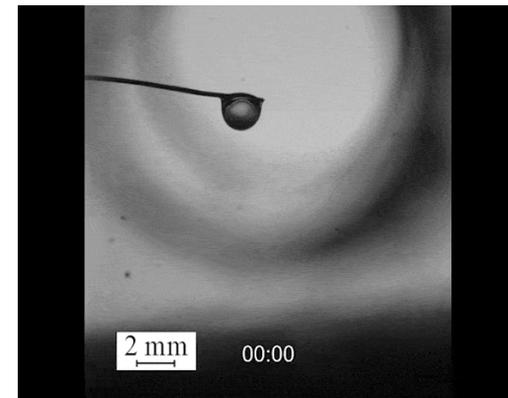
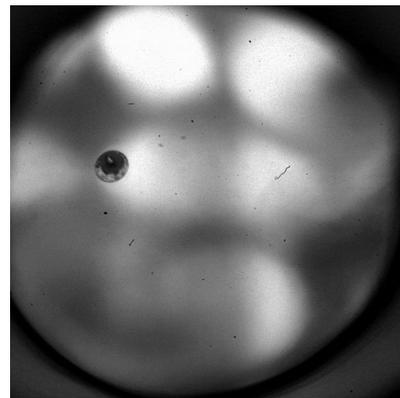
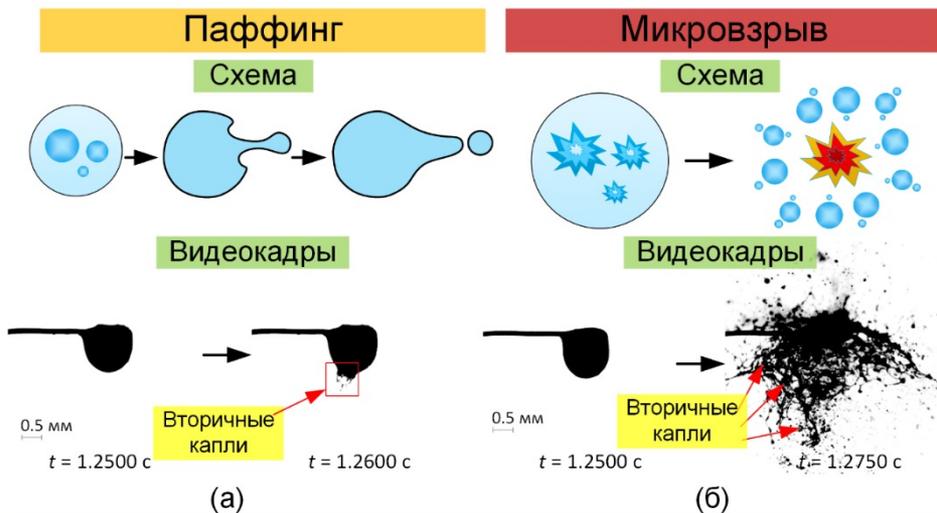


Схема микро-взрывного распада капли



Паффинг/микро-взрыв мультитопливных капель в вертолётных технологиях



Паффинг/микро-взрыв мультитопливных композиций в современных турбореактивных и турбовинтовых двигателях предлагается использовать для улучшения характеристик смешения паров топлива и воздуха. В свою очередь, это **приводит к более полному выгоранию топлива** и **снижению его расхода на 5-7 %**.

T. Bar-Kohany, D.V. Antonov, P.A. Strizhak, and S.S. Sazhin. Nucleation and bubble growth during puffing and micro-explosions in composite droplets. *Fuel*. August 2022. Under review.



СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ВЕРТОЛЕТНОЙ ИНДУСТРИИ В НОВЫХ РЕАЛИЯХ

9 ноября 2022, Москва

Двухжидкостная капля



Теневое изображение

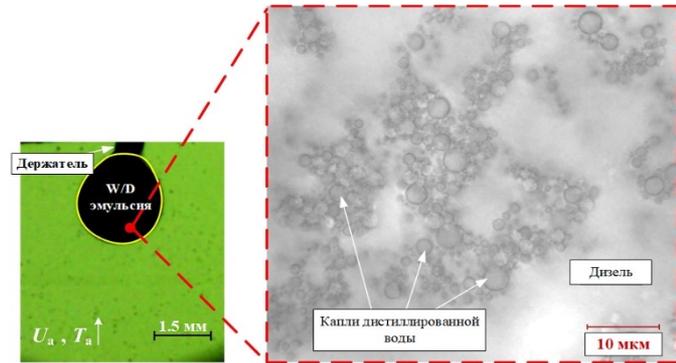
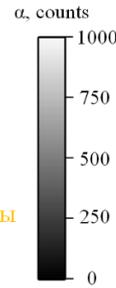


Внутренняя капелька воды
PLIF изображение

Двухжидкостная капля



PLIF/теневое изображение



Формирование капли эмульсии

Формирование двухжидкостной капли

Свойства горючих и негорючих жидкостей (при $T_d=293$ K), использованных в проведенных экспериментах

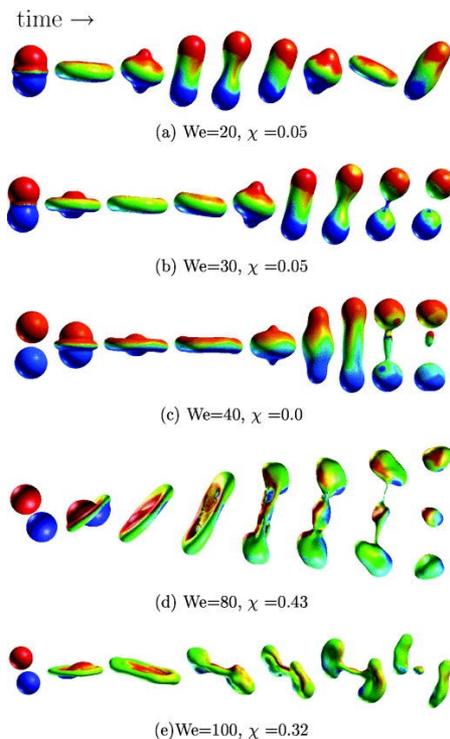
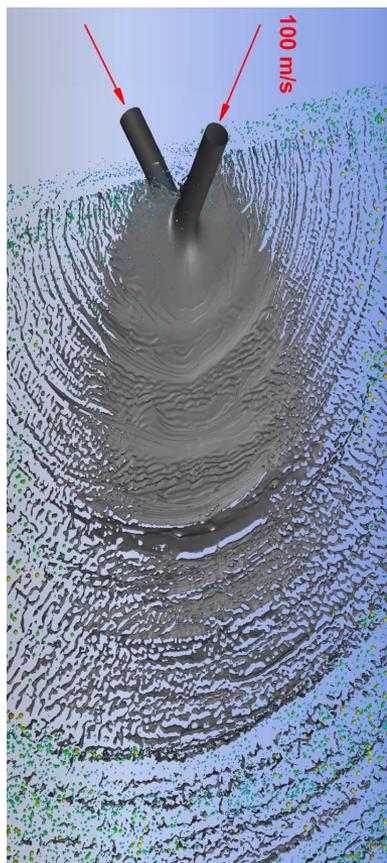
Жидкости	Свойства							
	k_f , Вт/(м·К)	C_f , Дж/кг	ρ_f , кг/м ³	κ_f , мм ² /с	μ_f , мПа·с	σ_f , Н/м	T_b , К	L , МДж/кг
Дистиллированная вода (ГОСТ 6709-72)	0.599	4182	998.2	0.144	1.004	0.072	373.15	2.368
Керосин (ТС-1)	0.133	2209	727.1	0.0828	0.814	0.023	447.3	0.372
Дизельное топливо (н-додекан)	0.137	2215	743.7	0.0832	1.314	0.025	489.5	0.354
Рапсовое масло (метилолеат)	0.115	2111	868.9	0.0627	4.737	0.031	617	0.338
Отработанное трансформаторное масло	0.115	2000	865	0.0665	2.509	0.029	623	0.209



СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ВЕРТОЛЕТНОЙ ИНДУСТРИИ В НОВЫХ РЕАЛИЯХ

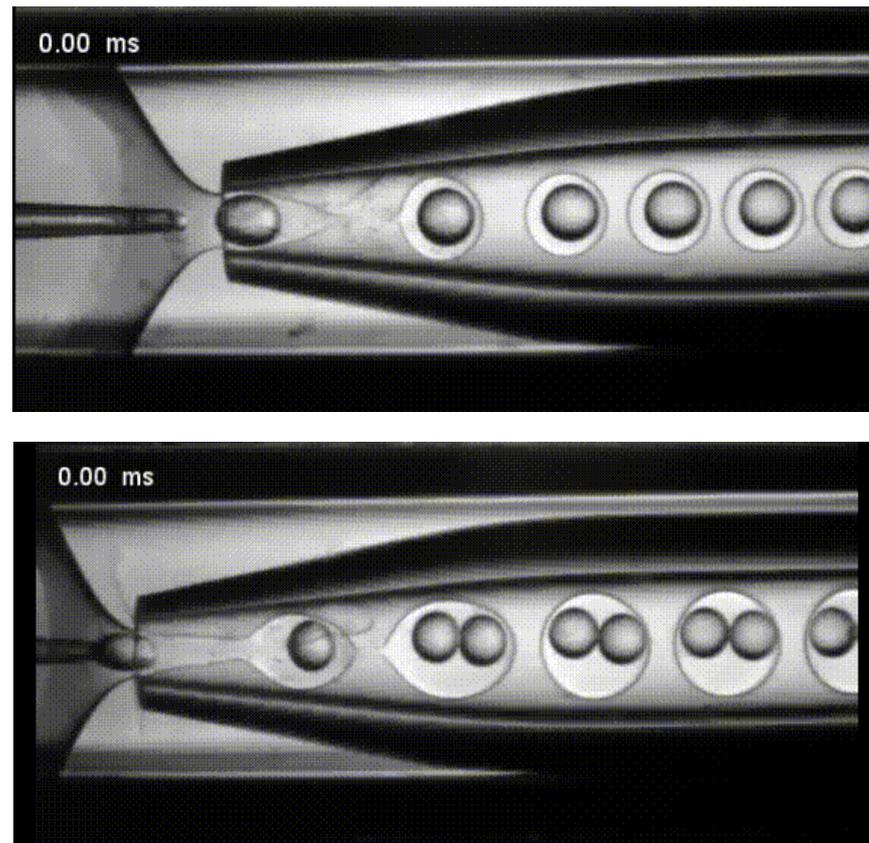
9 ноября 2022, Москва

Генерация двухжидкостных капель при столкновении потоков разнородных жидкостей



ANSYS Academic Research, ANSYS Fluent Theory Guide, in: ANSYS Help Syst., 2018.

Генерация двухжидкостных капель с помощью систем микрофлюидики

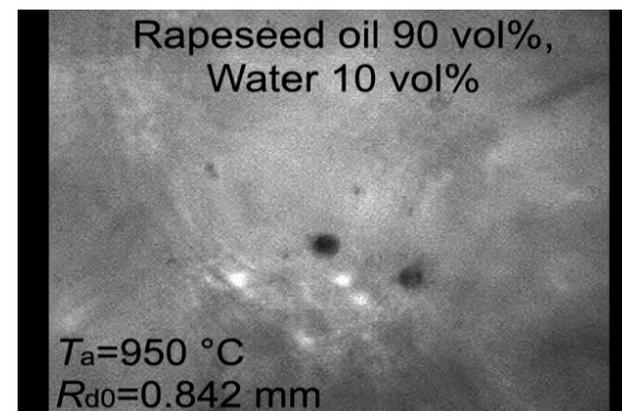
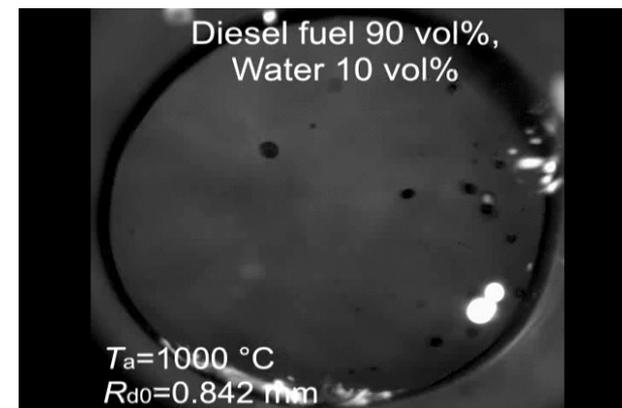


S.A. Nabavi, G.T. Vladislavljević, S. Gu, E.E. Ekanem, Double emulsion production in glass capillary microfluidic device: Parametric investigation of droplet generation behaviour, *Chemical Engineering Science*. 2015. V. 130. P. 183-196.



СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ВЕРТОЛЕТНОЙ ИНДУСТРИИ В НОВЫХ РЕАЛИЯХ

9 ноября 2022, Москва



Изображение пламени чистого керосина (а) и эмульгированного топлива (б)

Фрагментация группы двухжидкостных капель

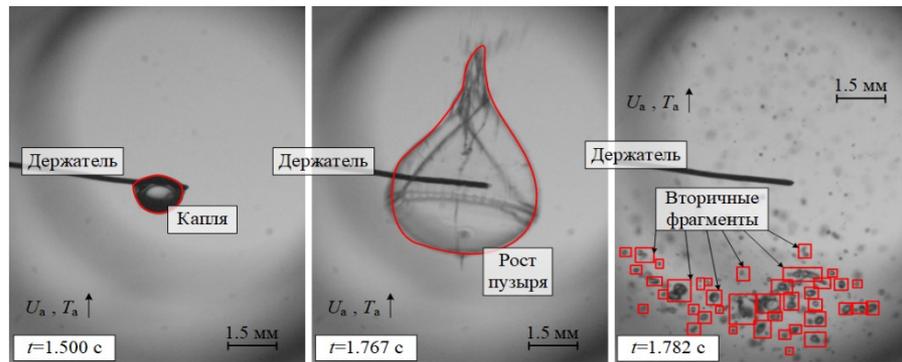
* S.H. Pourhoseini, R. Esmaeeli, Effect of nanosilver/water-in-kerosene emulsion on NO_x reduction and enhancement of thermal characteristics of a liquid fuel burner, *Energy Fuels*. 2017. V. 31. P. 14288-14295.



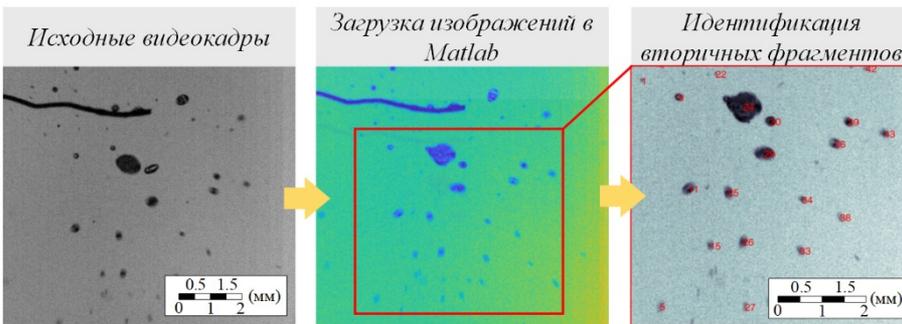
СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ВЕРТОЛЕТНОЙ ИНДУСТРИИ В НОВЫХ РЕАЛИЯХ

9 ноября 2022, Москва

Метод Shadow Photography (SP)



а

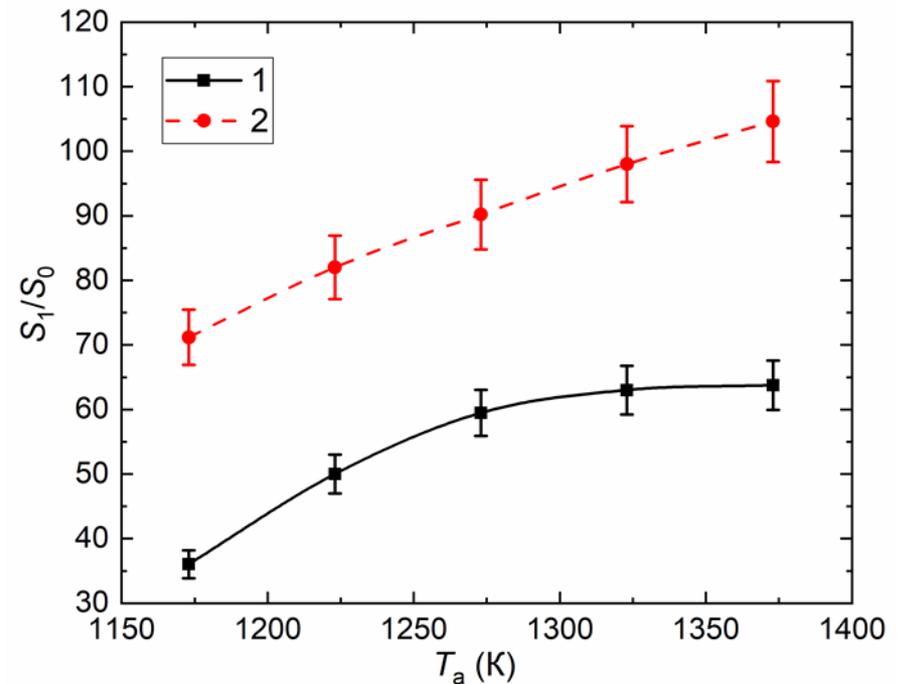


б

Пример схемы регистрации числа и размеров вторичных фрагментов при микро-взрывном распаде нагреваемой капли вода/рапсовое масло ($R_{d0} \approx 0.85$ мм, $T_a \approx 650$ К, 10% воды): а – в Mathematica; б – в Matlab.

Формула для расчета отношения площадей поверхности испарения смеси жидкостей после и до распада:

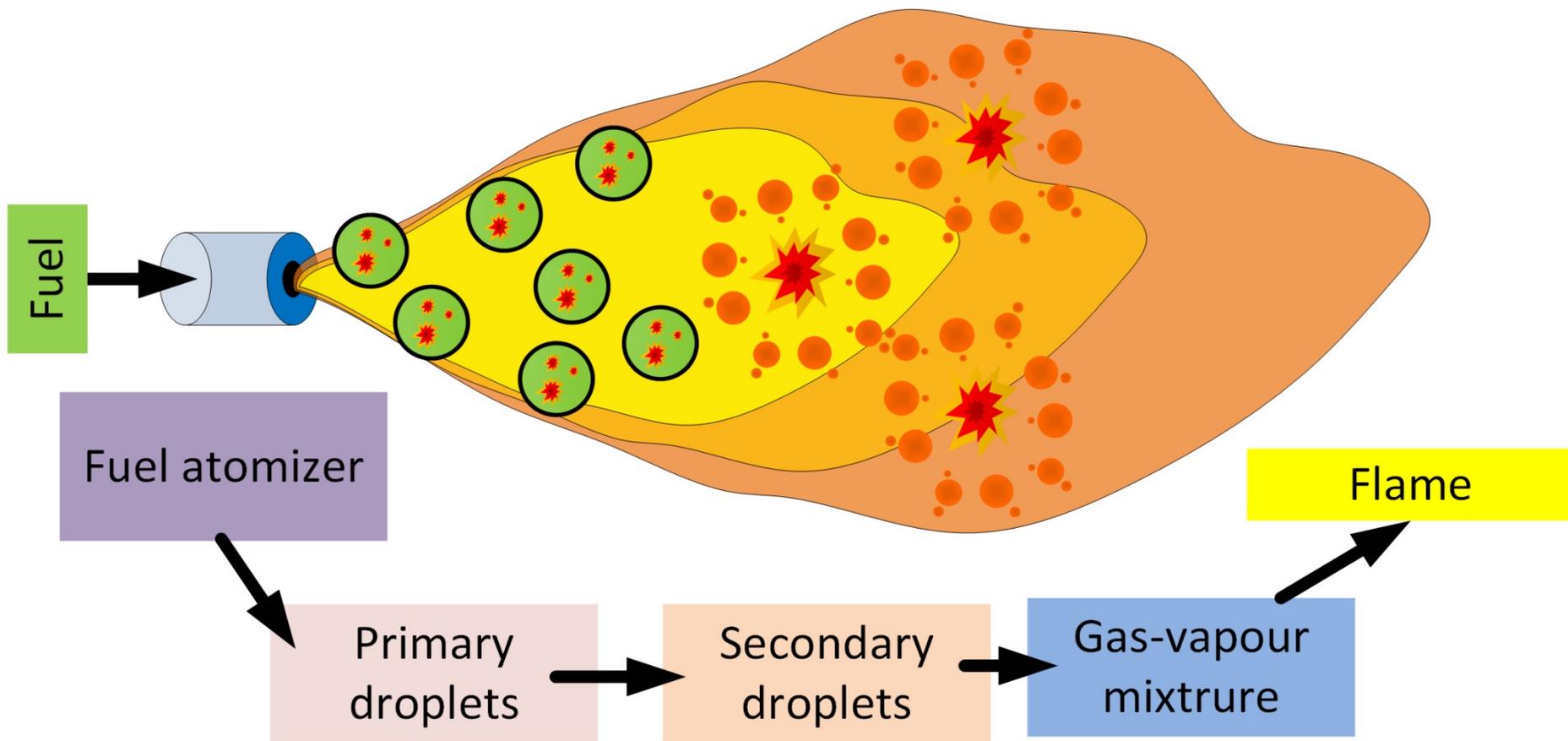
$$S_1 / S_0 = \frac{N_{cd} \cdot 4\pi r_{cd,av}^2}{4\pi R_{d0}^2} = \frac{N_{cd} \cdot r_{cd,av}^2}{R_{d0}^2} = \frac{4 / 3\pi R_{d0}^3 r_{cd,av}^2}{4 / 3\pi r_{cd,av}^3 R_{d0}^2} = \frac{R_{d0}}{r_{cd,av}}$$



Зависимости отношения площади поверхности испарения смеси жидкостей после и до распада S_1/S_0 от температуры греющей среды для двухжидкостных капель при свободном падении ($D_0 \approx 1.68$ мм): 1 – 90% дизель, 10% вода; 2 – 90% рапсовое масло, 10% вода



СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ВЕРТОЛЕТНОЙ ИНДУСТРИИ В НОВЫХ РЕАЛИЯХ
9 ноября 2022, Москва

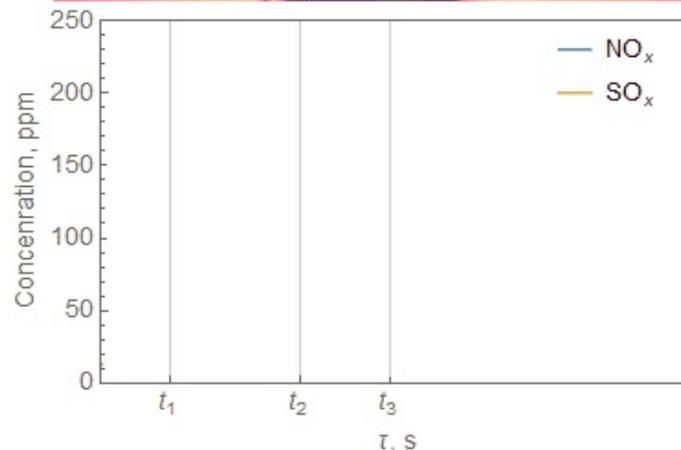
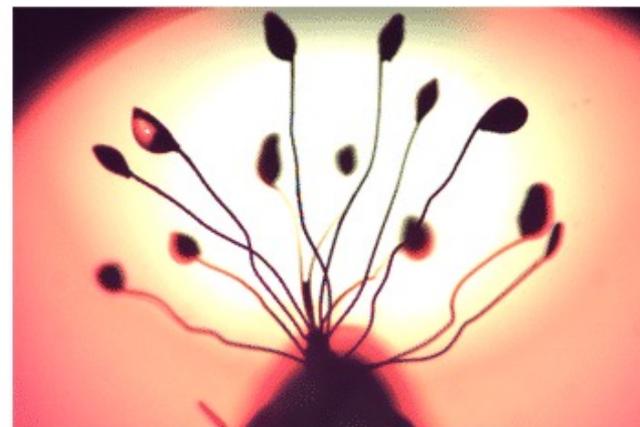
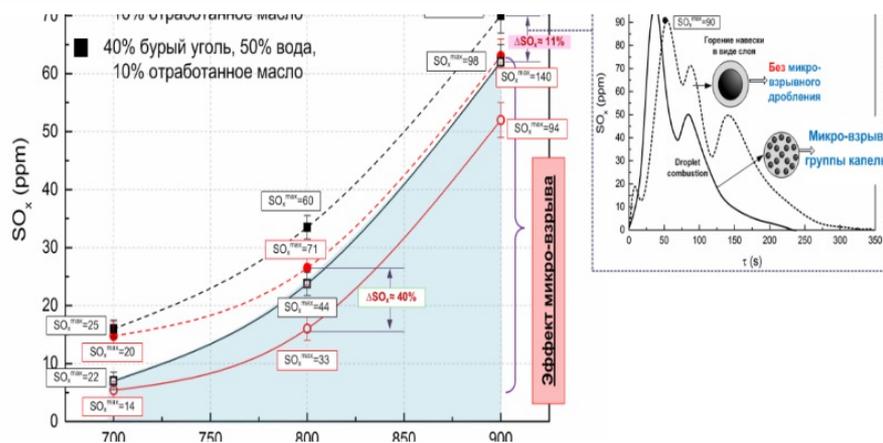
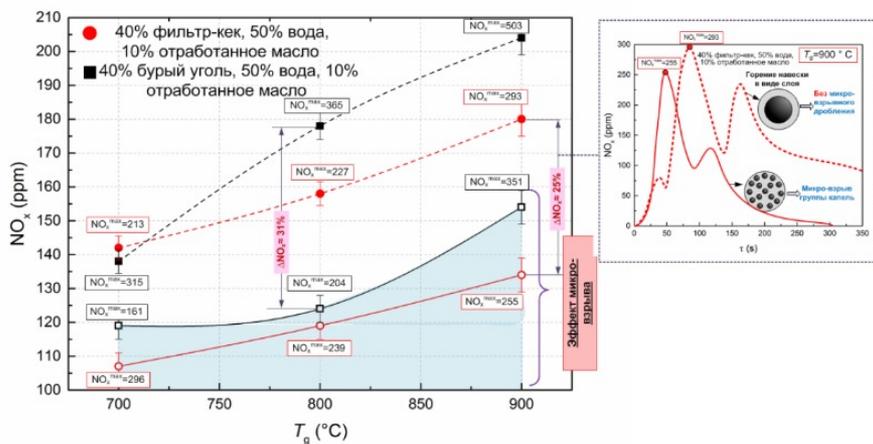


H. Watanabe, Y. Suzuki, T. Harada, Y. Matsushita, H. Aoki, T. Miura, An experimental investigation of the breakup characteristics of secondary atomization of emulsified fuel droplet, *Energy*. 2010. V. 35. P. 806-813.



СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ВЕРТОЛЕТНОЙ ИНДУСТРИИ В НОВЫХ РЕАЛИЯХ

9 ноября 2022, Москва



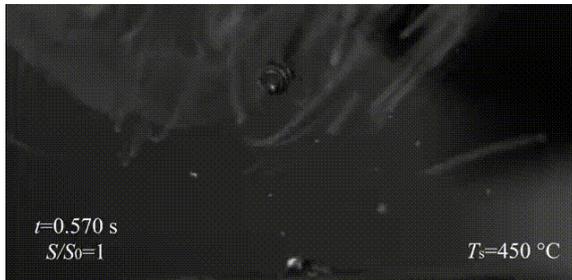
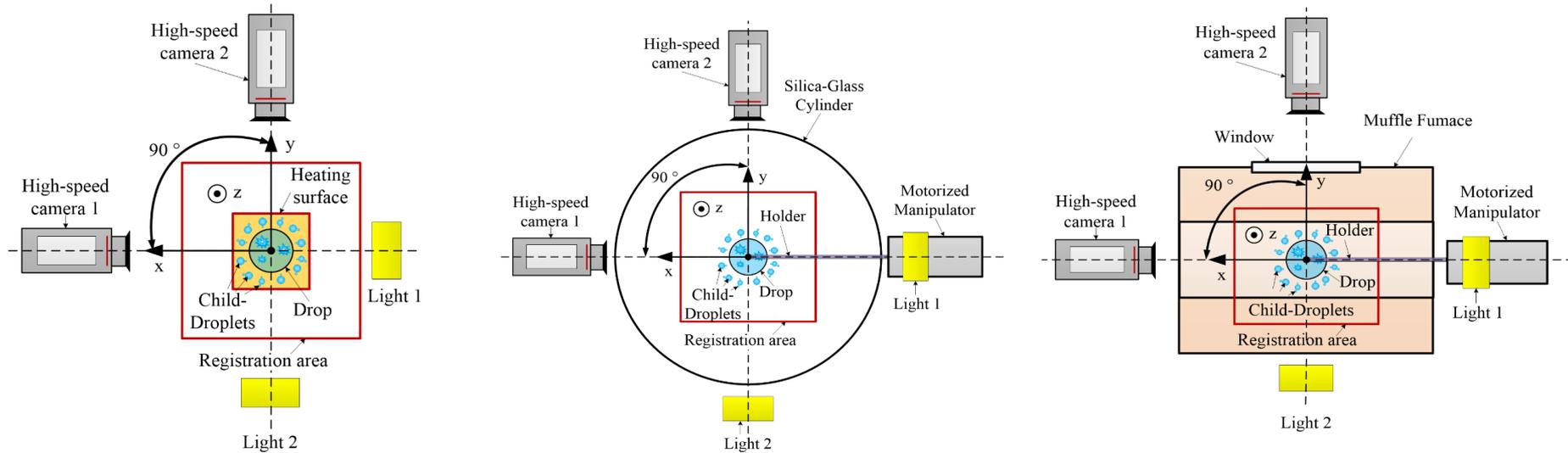
Зависимость концентраций оксидов азота (а) и серы (b) от температуры в камере сгорания при наличии (сплошная) и отсутствии (пунктирная) эффекта микро-взрывного распада для рассматриваемых топлив.

Иллюстрация процесса зажигания и фрагментации группы капель ОВУТ (9% фильтр-кек, 81% вода, 10% рапсовое масло) совмещенного с трендами концентраций оксидов серы и азота, образующихся в процессе горения, при температуре в камере сгорания 1100 °C

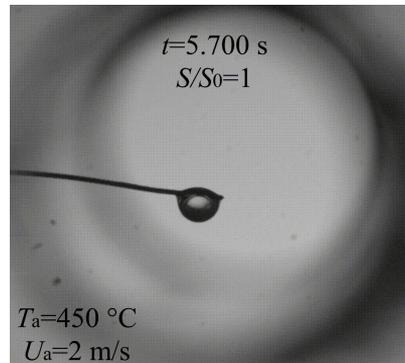


СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ВЕРТОЛЕТНОЙ ИНДУСТРИИ В НОВЫХ РЕАЛИЯХ

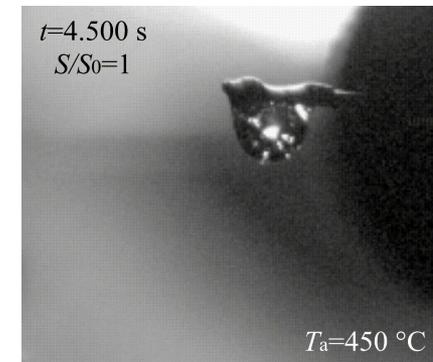
9 ноября 2022, Москва



(a)



(б)



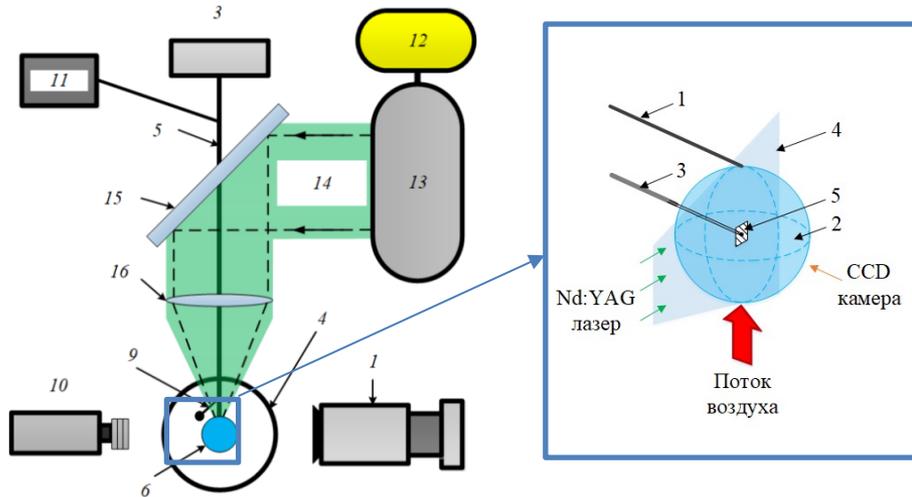
(в)

Лабораторные схемы нагрева гетерогенных капель: **а** – на разогретой подложке; **б** – в потоке разогретого воздуха; **в** – в муфельной печи



СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ВЕРТОЛЕТНОЙ ИНДУСТРИИ В НОВЫХ РЕАЛИЯХ

9 ноября 2022, Москва

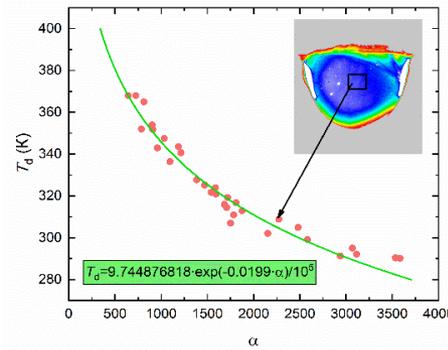


Схематическое изображение экспериментального стенда при нагреве в потоке разогретых газов с учетом лазерной подсветки:

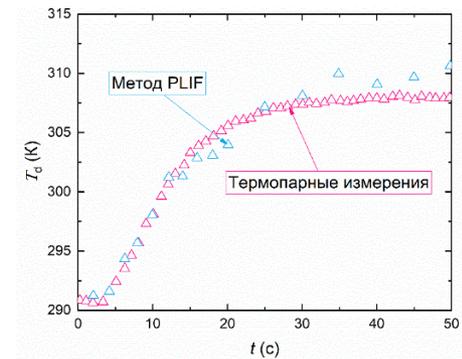
- 1 – высокоскоростная видеокамера;
- 2 – осветительный прожектор;
- 3 – моторизованное координатное устройство (МКУ);
- 4 – цилиндр из кварцевого стекла;
- 5 – держатель;
- 6 – двухжидкостная капля;
- 7 – вторичные фрагменты;
- 8 – регистрационная область;
- 9 – термопара;
- 10 – кросскорреляционная камера;
- 11 – регистратор температуры (National Instruments);
- 12 – лазер;
- 13 – оптика для формирования лазерного луча;
- 14 – лазерный луч;
- 15 – оптическое зеркало;
- 16 – собирающая линза.

Характеристики элементов экспериментального стенда

Лазер	Nd:YAG Quantel EverGreen 70 лазер (длина волны 532 нм, максимальная энергия 74 мДж)
Камера	ImperX B2020M кросс-корреляционная цифровая камера (частота записи 25 кадров в секунду, разрешение 2048 × 2048 пикселей)
Флуорофор	Rhodamine B



а



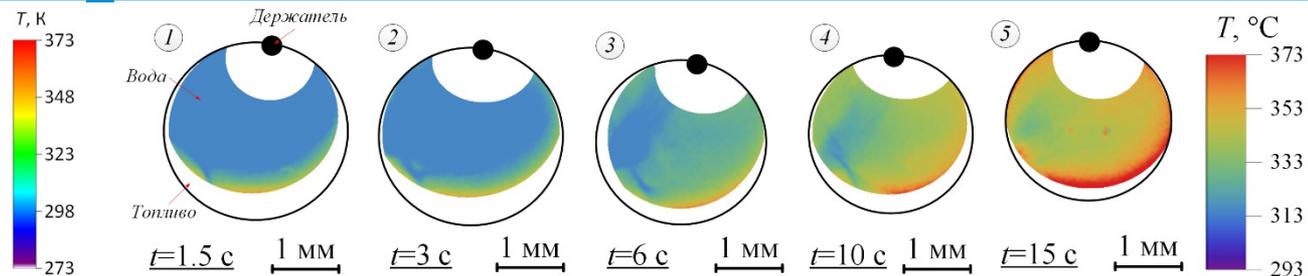
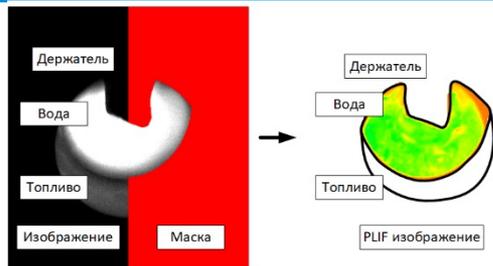
б

Экспериментальная калибровочная кривая (а) и результаты сопоставления температур в центре капли (при $V_d \approx 10$ мкл, $R_d \approx 1.53$ мм, $U_a \approx 3$ м/с, $T_a \approx 373$ К), полученных при применении метода PLIF и миниатюрной термопары (б)



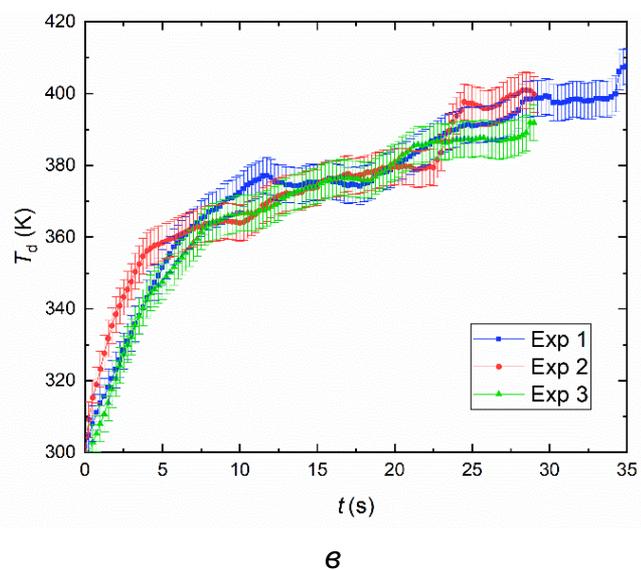
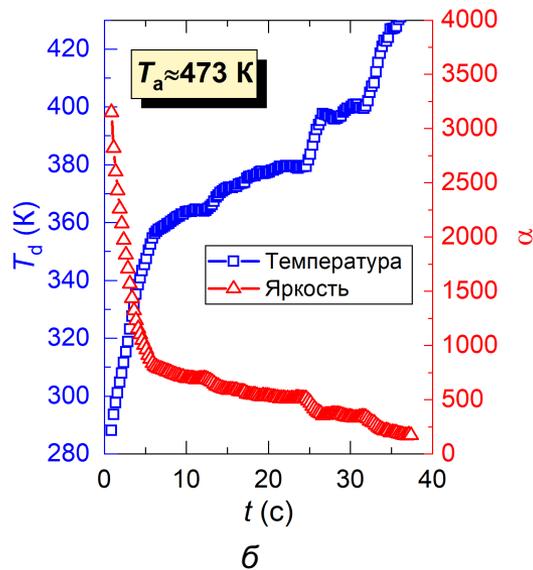
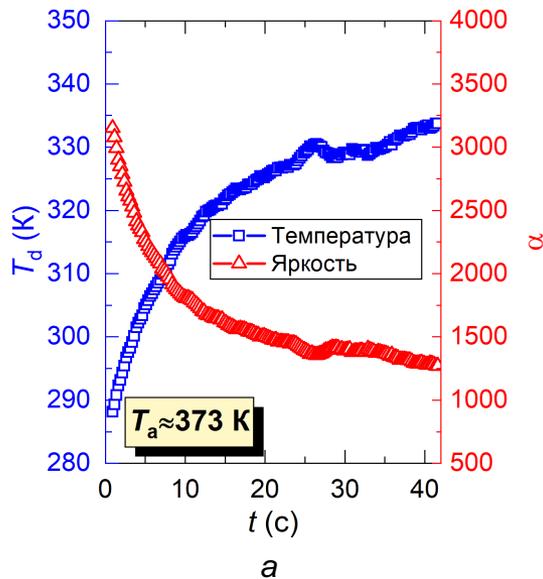
СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ВЕРТОЛЕТНОЙ ИНДУСТРИИ В НОВЫХ РЕАЛИЯХ

9 ноября 2022, Москва

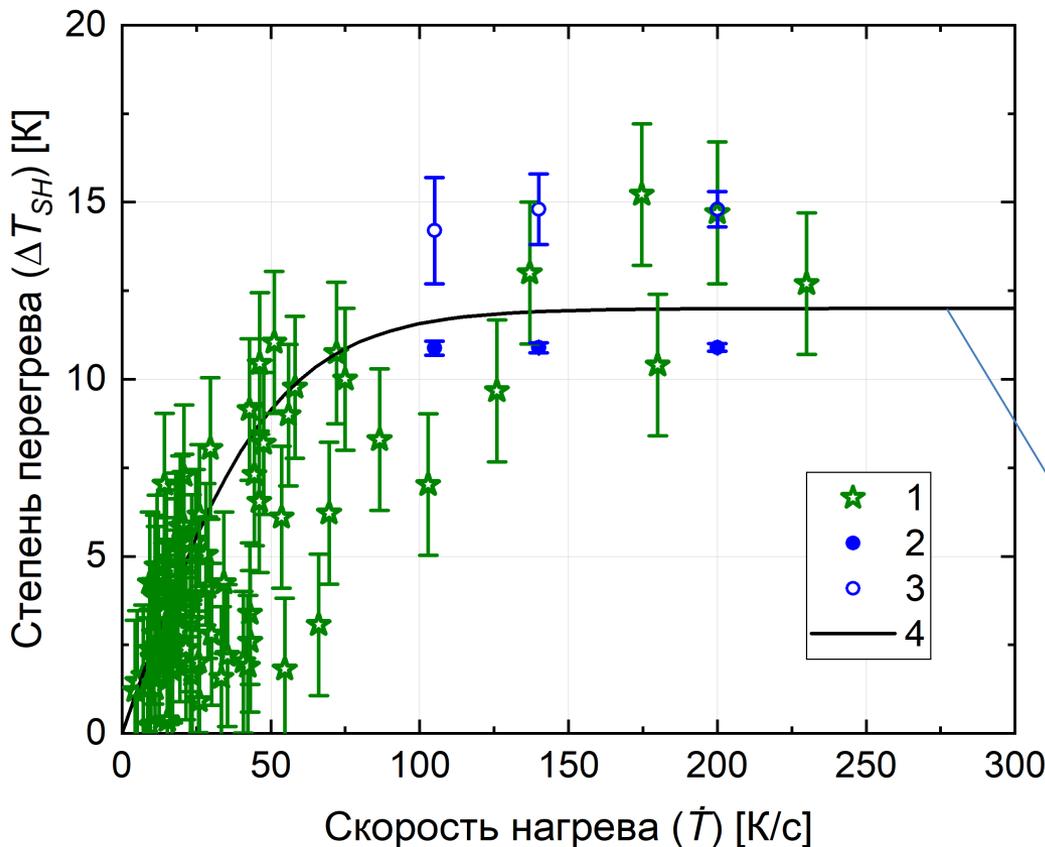


Процедура маскирования при обработке температурных полей двухжидкостных капель

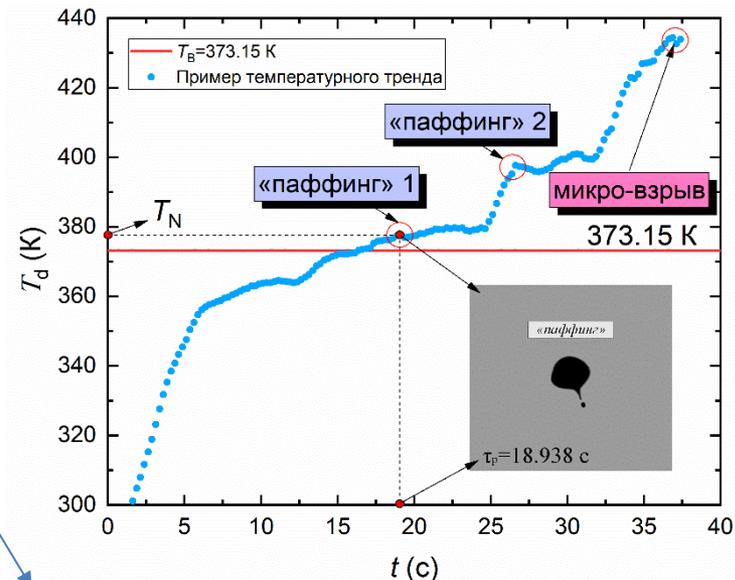
Типичные температурные поля двухжидкостных капель (вода/трансформаторное масло, объемная концентрация воды 50%) в разные моменты времени ($T_a \approx 473$ К, $U_a \approx 2$ м/с, $Rd_0 \approx 1.53$ мм)



Яркость в относительных единицах (α) и температура (T_d) воды в двухжидкостных каплях (вода/трансформаторное масло, объемная концентрация воды 50%) в разные моменты времени ($U_a \approx 2$ м/с, $Rd_0 \approx 1.53$ мм): а – $T_a \approx 373$ К; б – $T_a \approx 473$ К; в – результаты серии измерений, $T_a \approx 473$ К



Пояснения к расчету степени перегрева:



$$\Delta T_{SH} = (T_N - T_B) = 12 \cdot \tanh(\dot{T} / 50), 0 \leq \dot{T} \leq 300 \text{ K/s} \quad (I)$$

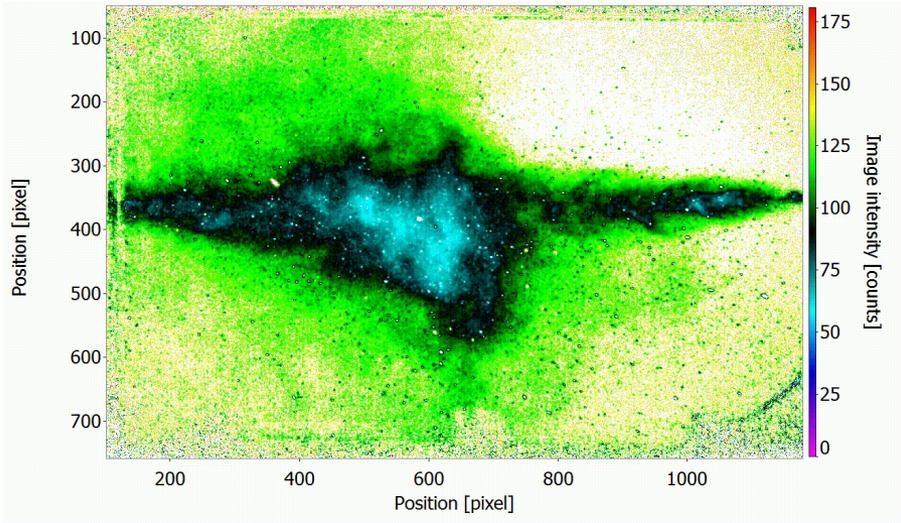
Значения степени перегрева $\Delta T_{SH} = T_N - T_B$ в экспериментах с двухжидкостными каплями, полученные методом PLIF (1), и в экспериментах авторов Su et al. (2016) (2, 3). Кривая (4) описывается аппроксимационным выражением (I) для экспериментальных точек (1)-(3).

S.S. Sazhin, T. Bar-Kohany, Z. Nissar, **D.V. Antonov**, P.A. Strizhak, O.D. Rybdylova, A new approach to modelling micro-explosions in composite droplets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. V. 161. №120238.

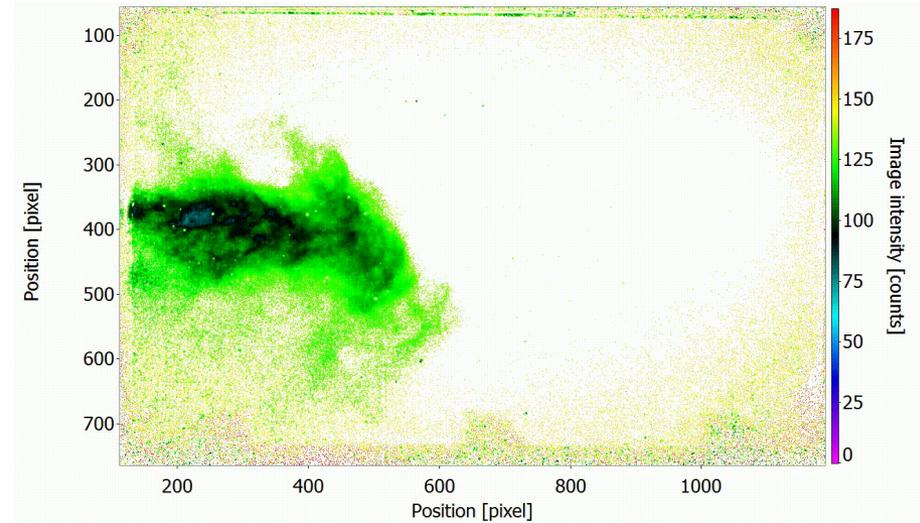


СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ВЕРТОЛЕТНОЙ ИНДУСТРИИ В НОВЫХ РЕАЛИЯХ

9 ноября 2022, Москва



Видеокадры, иллюстрирующие движение капель ВУТ (фильтр-кек 50 wt%, вода 50 wt%) при распылении двумя встречными форсунками при $G_a \approx 50$ kg/h для scheme #3–1 (shooting frequency – 1000 fps; video playback frequency – 10 fps)



Видеокадры, иллюстрирующие движение капель ВУТ (фильтр-кек 50 wt%, вода 50 wt%) во встречном направленном потоке воздуха (образование Stopping zone) при $G_a \approx 50$ kg/h для scheme #4 (shooting frequency – 1000 fps; video playback frequency – 10 fps)



СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ВЕРТОЛЕТНОЙ ИНДУСТРИИ В НОВЫХ РЕАЛИЯХ
9 ноября 2022, Москва

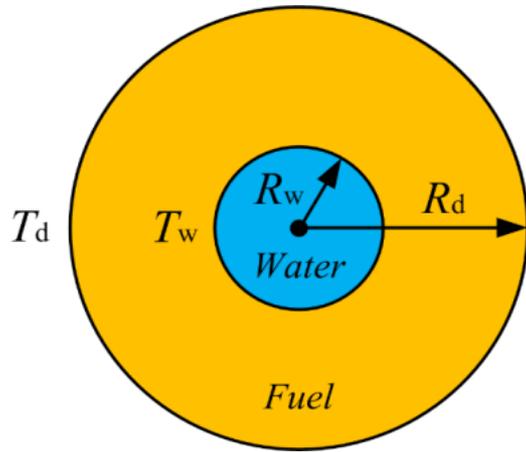


Схема области решения задачи 1

Критерий (механизм) распада

$$\underline{T_w \geq T_B (T_N)}$$

T_w – температура на границе вода/топливо, К

T_B – температура кипения, К

T_N – температура начала взрывного кипения, К

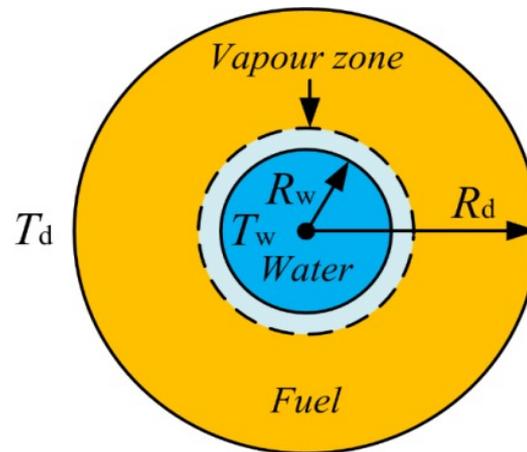


Схема области решения задачи 2

Критерий (механизм) распада

$$F_{\text{sat}} \geq F_{\text{sigma}} + F_{\text{amb}}$$

F_{sat} – сила со стороны давления насыщенных паров, Н

F_{sigma} – сила поверхностного натяжения, Н

F_{amb} – сила со стороны атмосферного давления, Н

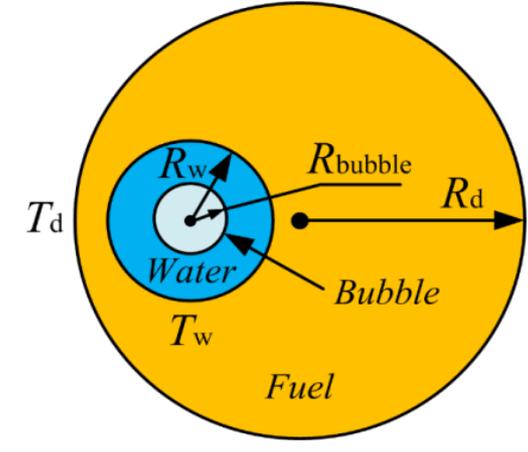


Схема области решения задачи 3

Критерий (механизм) распада

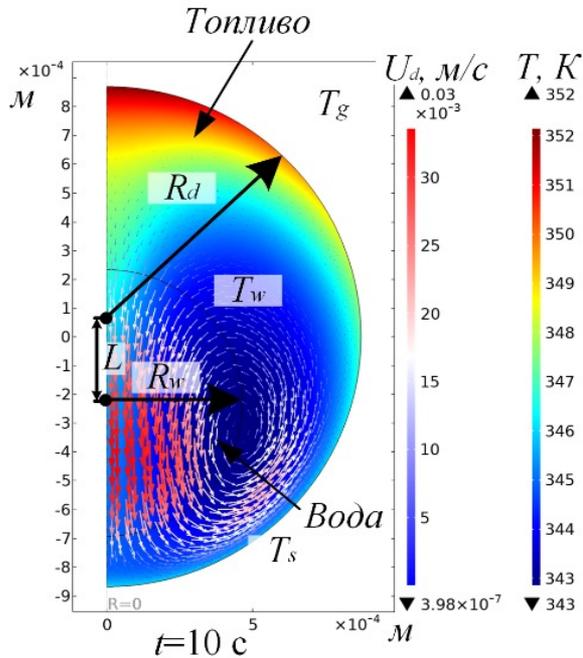
$$K = \frac{R_{\text{bubble}}}{R_{d0}} = 2-3$$

K – критерий

R_{bubble} – радиус пузыря, м

R_{d0} – начальный радиус, м

D.V. Antonov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, The micro-explosive fragmentation criteria of two-liquid droplets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. V. 196. №123293.



Уравнение энергии в сферической системе координат:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial T}{\partial R} \right) + P(t, R) \quad \kappa = \begin{cases} \kappa_w = k_w / (c_w \rho_w) & \text{at } R \leq R_w \\ \kappa_f = k_f / (c_f \rho_f) & \text{at } R_w < R \leq R_d \end{cases}$$

$k_{w(f)}$, $c_{w(f)}$ и $\rho_{w(f)}$ – теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность воды (жидкого топлива) соответственно; R – расстояние от центра капли, t – время. $P(R; t)$ – источник дополнительного нагрева капли (нагрев за счет радиации, дополнительный тепловой поток от держателя, химические реакции и т.д.).

Уравнение диффузии компонентов в сферической системе координат:

$$\frac{\partial Y_{li}}{\partial t} = D_1 \left(\frac{\partial^2 Y_{li}}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial Y_{li}}{\partial R} \right),$$

D_1 – коэффициент диффузии; R – расстояние от центра капли, t – время, Y_{li} – массовая концентрация i -го компонента.

Схема области решения задачи тепломассопереноса в двухжидкостных каплях в условиях естественной конвекции:

- R_d – радиус двухжидкостной капли,
- R_w – радиус водяного ядра,
- T_s – температура поверхности капли,
- T_w – температура на границе вода/топливо,
- T_g – температура газа,
- L – смещение водяного ядра относительно центра.

$$\rho \nabla \cdot u = 0,$$

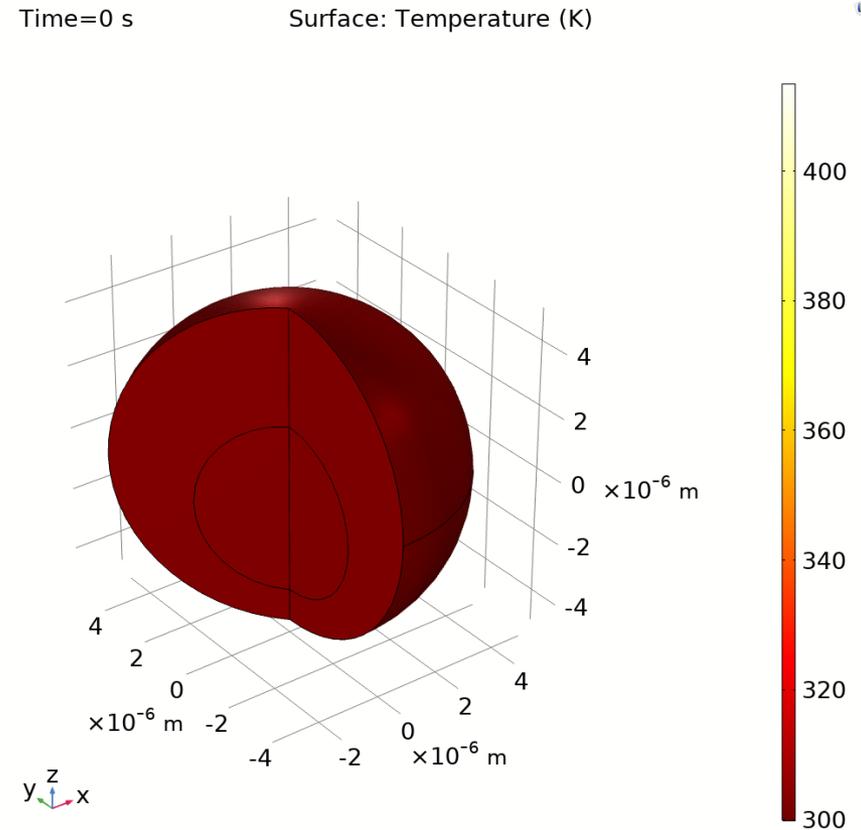
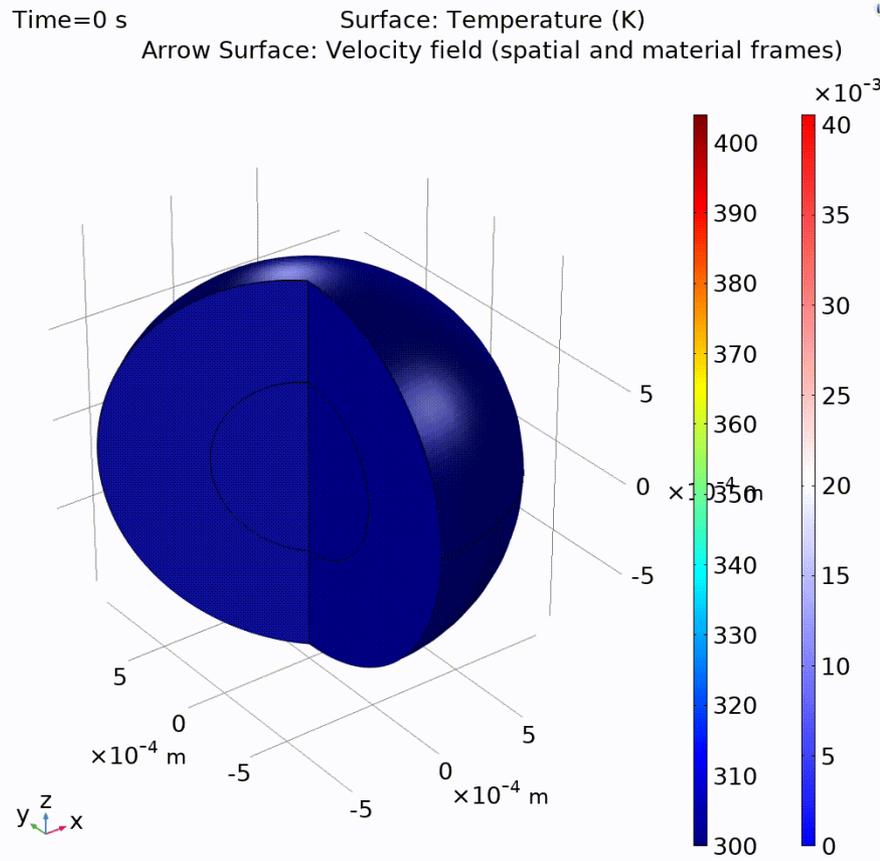
$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \nabla)u = \nabla \left[-pI + \mu \left(\nabla u + (\nabla u)^T \right) \right] + F_g,$$

где ρ – плотность жидкости, u – вектор скорости, t – время, p – давление, μ – динамическая вязкость, I – единичная матрица, F_g – сила тяжести к единиц объема.



СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ВЕРТОЛЕТНОЙ ИНДУСТРИИ В НОВЫХ РЕАЛИЯХ

9 ноября 2022, Москва



D.V. Antonov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, The micro-explosive fragmentation criteria of two-liquid droplets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. V. 196. №123293.



Спасибо за внимание!

Автор доклада (Антонов Дмитрий
Владимирович, к.ф.-м.н., доцент)

Национальный исследовательский Томский
политехнический университет

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта российского научного фонда (РНФ 21-71-10008, <https://rscf.ru/project/21-71-10008/>) и Приоритет 2030 (Приоритет-2030-НИП/ЭБ-038-1308-2022)