

Деформация и дробление капель композиционных топлив при воздействии воздушного потока

XXII Международная конференция по
Вычислительной механике и современным
прикладным программным системам
(VMСППС'2021)



Алушта, 07.09.2021

Стрижак Павел Александрович
д.ф.-м.н., профессор

АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

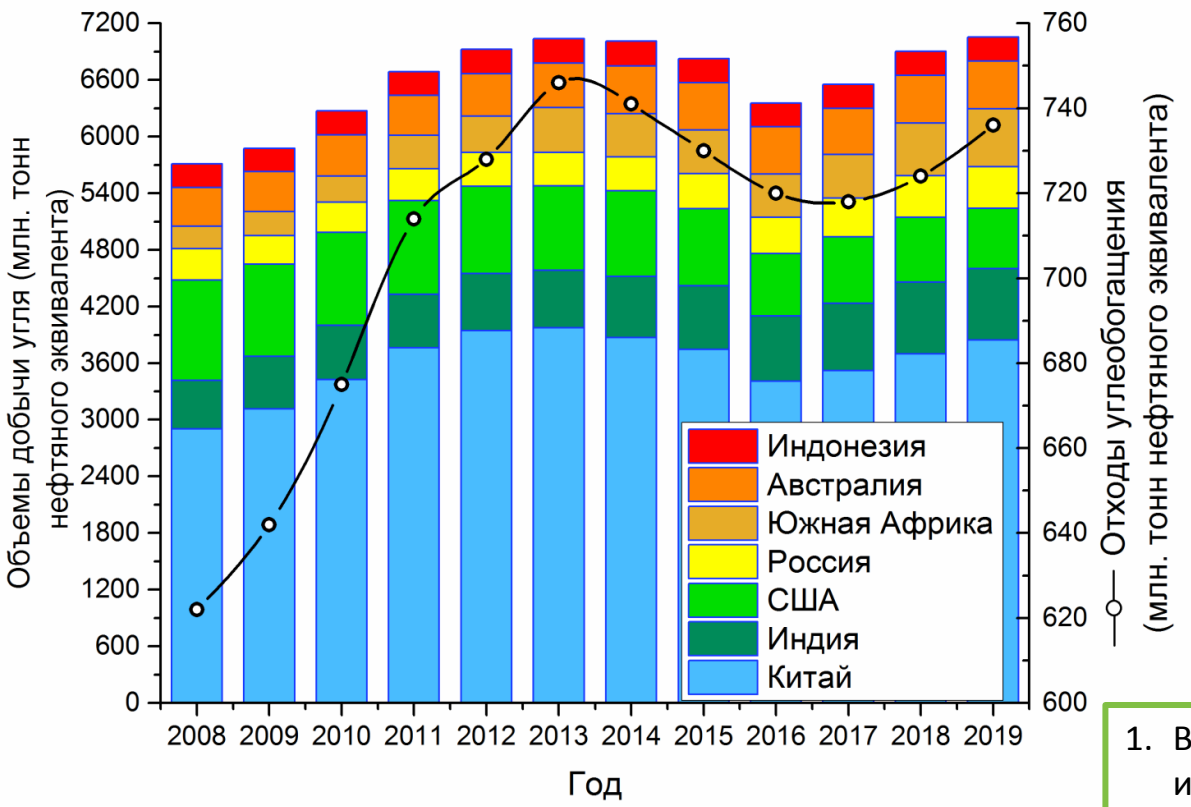


Рис. 1. Объемы производства угля и отходов его переработки в период с 2008 по 2019 год [1]

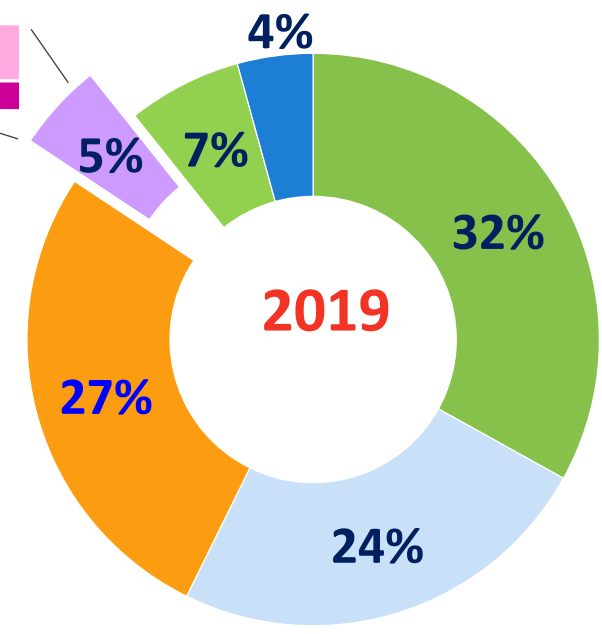


Рис. 2. Потребление первичных энергоресурсов [1]



Рис. 3. Мировая выработка электроэнергии [1]

1. В первой половине 2020 года глобальный **прирост мощностей** возобновляемых источников электроэнергии **был на 11% ниже**, чем за тот же период в 2019 году [2].
2. Мощности угольной генерации в 2020 году остались **на прежнем уровне** (2 125 ГВт) [2].

[1] BP Statistical Review of World Energy 2020.

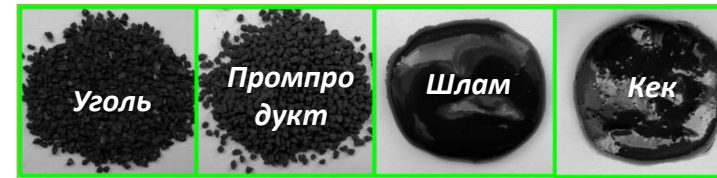
<http://www.bp.com/statisticalreview>

[2] Electricity Market Report - December 2020. International Energy Agency.

<https://webstore.iea.org/>

*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. Article number 121257. DOI: 10.1016/j.energy.2021.

ВОЗДЕЙСТВИЕ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ [1]



№ п/п	Показатели	Единицы измерения	Отчет	
			2016 г.	2017 г.
1	Объем добычи угля	млн т	385.7	408.9
	Выброшено загрязняющих веществ, всего	млн т	1.0	1.1
	в том числе			
	твердые вещества	млн т	0.058	0.065
2	диоксид серы	млн т	0.010	0.011
	оксид углерода	млн т	0.036	0.039
	оксиды азота	млн т	0.019	0.027
	углеводороды	млн т	0.879	0.954
3	Забрано воды	млн м ³	35.3	35.1
4	Использовано воды, всего	млн м ³	99.6	98.0
5	Сброшено сточных вод, всего	млн м ³	437.6	458.9
6	Общий объем сточных вод, требующих очистки	млн м ³	410.5	432.9
7	Объем организованного сброса загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты	млн т	0.129	0.152
	Наличие отходов:			
8	На начало года, всего	млн т	21 667.8	21 029.1
	На конец года, всего	млн т	21 029.1	21 576.2
9	Образовано отходов за год	млн т	3 326.6	3 598.0
10	Размещено отходов во внешних отвалах	млн т	1 526.9	1 841.8
11	Использовано отходов, всего	млн т	1 690.1	1 963.2
12	Обезврежено отходов на предприятии, всего	млн т	0.0004	0.0009
	Передано отходов сторонним организациям	млн т	365.2	355.4
	в том числе			
13	для обезвреживания	млн т	0.00006	0.00002
	для использования	млн т	14.0	7.9

№ п/п	Показатели	Единицы измерения	Отчет	
			2016 г.	2017 г.
14	Площадь нарушенных земель:			
	на конец года	га	111 200	115 390
	Инвестиции, направляемые на охрану окружающей среды, всего	млн. руб.	902.5	2 037.4
	в том числе			
15	на сбор и очистку сточных вод	млн. руб.	511.6	1 972.4
	на охрану атмосферного воздуха и предотвращение изменения климата	млн. руб.	10.5	6.1
	на охрану земель от отходов производства и потребления	млн. руб.	37.5	0.6
	на защиту и реабилитацию земель	млн. руб.	18.6	49.5
	Текущие затраты на охрану окружающей среды, всего	млн. руб.	1 165.0	1 537.7
	в том числе			
16	на сбор и очистку сточных вод	млн. руб.	535.3	716.8
	на охрану атмосферного воздуха	млн. руб.	359.9	519.7
	на охрану земель от отходов производства и потребления	млн. руб.	154.1	197.6
	на защиту и реабилитацию земель	млн. руб.	82.8	65.8

*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. Article number 117390. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117390

ИССЛЕДОВАННЫЕ СОСТАВЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ (КЖТ)

№	Состав суспензии	ρ , кг/м ³	ν , м ² /с	$\sigma \times 10^{-3}$, Н/м	№	Состав суспензии	ρ , кг/м ³	ν , м ² /с	$\sigma \times 10^{-3}$, Н/м
1	Фильтр-кек угля марки Д 50%, вода 50%	1252	0.157	72.86	11	Фильтр-кек угля марки Д 50%, вода 47.5%, турбинное масло 2.5%	1097	0.327	71.71
2	Фильтр-кек угля марки Д 40%, вода 60%	1120	0.107	72.86	12	Фильтр-кек угля марки Д 50%, вода 45%, турбинное масло 5%	1135	0.493	70.57
3	Фильтр-кек угля марки Д 60%, вода 40%	1381	0.184	72.86	13	Фильтр-кек угля марки Д 50%, вода 40%, турбинное масло 10%	1240	2.03	68.27
4	Фильтр-кек угля марки Д 85%, вода 15%	1614	0.253	72.86	14	Фильтр-кек угля марки Д 37%, вода 61%, древесные опилки 2%	1112	0.216	72.86
5	Каменный уголь марки Д 50%, вода 50%	1210	0.276	72.86	15	Фильтр-кек угля марки Д 35%, вода 61%, древесные опилки 4%	1158	0.198	72.86
6	Каменный уголь марки Д 40%, вода 60%	1087	0.195	72.86	16	Фильтр-кек угля марки Д 50%, вода 45%, арахисовая шелуха 5%	1105	0.231	72.86
7	Каменный уголь марки Д 45%, вода 55%	1132	0.217	72.86	17	Каменный уголь марки Д 50%, вода 49.75%, неонол 0.25%	1210	0.286	72.52
8	Бурый уголь марки Б2 40% (80 мкм), вода 60%	1192	0.198	72.86	18	Каменный уголь марки Д 50%, вода 49%, неонол 1%	1210	0.52	71.51
9	Бурый уголь марки Б2 40% (100 мкм), вода 60%	1184	0.193	72.86	19	Каменный уголь марки Д 50%, вода 49.75%, твин 0.25%	1210	0.431	78.06
10	Бурый уголь марки Б2 40% (140 мкм), вода 60%	1175	0.189	72.86	20	Каменный уголь марки Д 50%, вода 49.5%, кукурузный крахмал 0.5%	1210	0.162	73.26

МЕТОДЫ ПЕРВИЧНОГО И ВТОРИЧНОГО РАСПЫЛЕНИЯ КЖТ

Первичное распыление ($R_d=0.1-2.5$ мм)



Вторичное измельчение ($R_d=0.001-0.5$ мм)

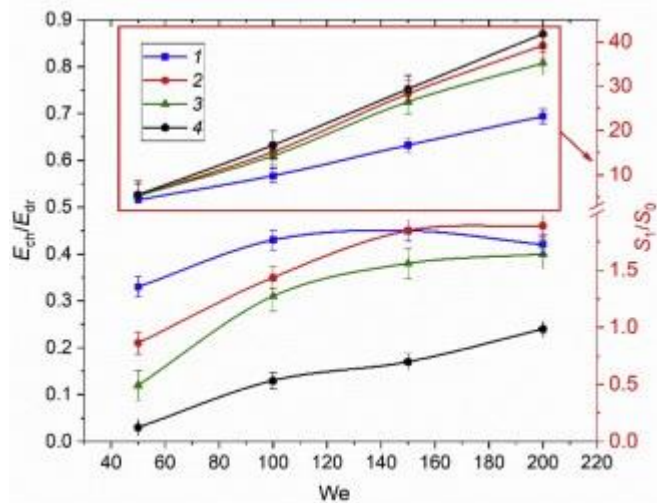
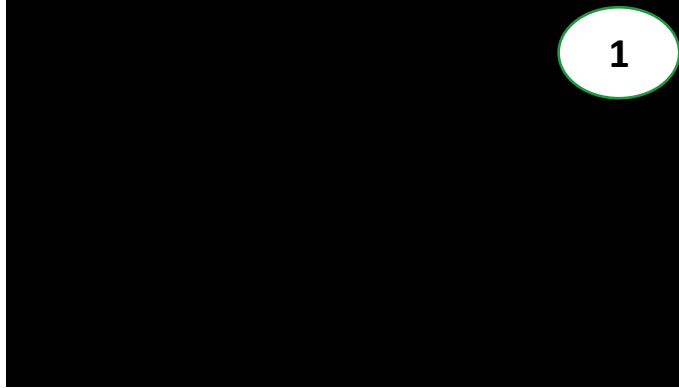


Рис. 4. Отношение кинетических энергий и площадей поверхности после и до взаимодействия капель в зависимости от числа Вебера при воздействии воздушной струи.

1



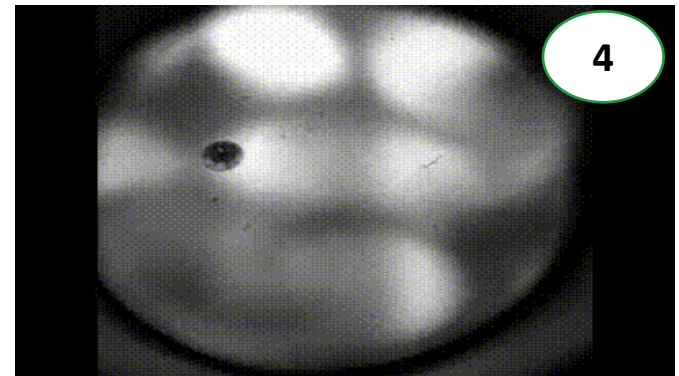
Соударения капель между собой
 $R_d=0.01-0.3$ мм

2



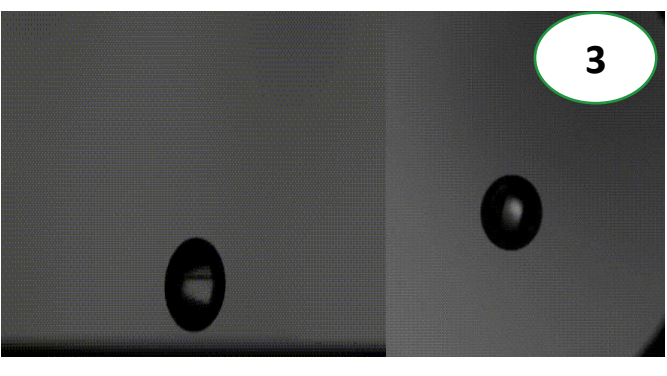
Разрушение капли в газовом потоке
 $R_d=0.005-0.2$ мм

4



Микро-взрывное измельчение
капель $R_d=0.001-0.1$ мм

3



Соударение капли с твердой
подложкой $R_d=0.001-0.2$ мм

*Antonov, D.V., Shlegel, N.E., Strizhak, P.A., Tarlet, D., Bellettre, J. Energy analysis of secondary droplet atomization schemes. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2020. V. 117, Article number 104666.

ПЕРВИЧНОЕ РАСПЫЛЕНИЕ КЖТ

Рис. 5. Пример определения абсолютных и относительных объемов, занимаемых каплями трех различных групп размеров в камере для распыления (для состава 40% кек, 60% вода при $G_f \approx 133$ кг/ч, $G_a \approx 50$ кг/ч, $U_a \approx 16.52$ м/с).

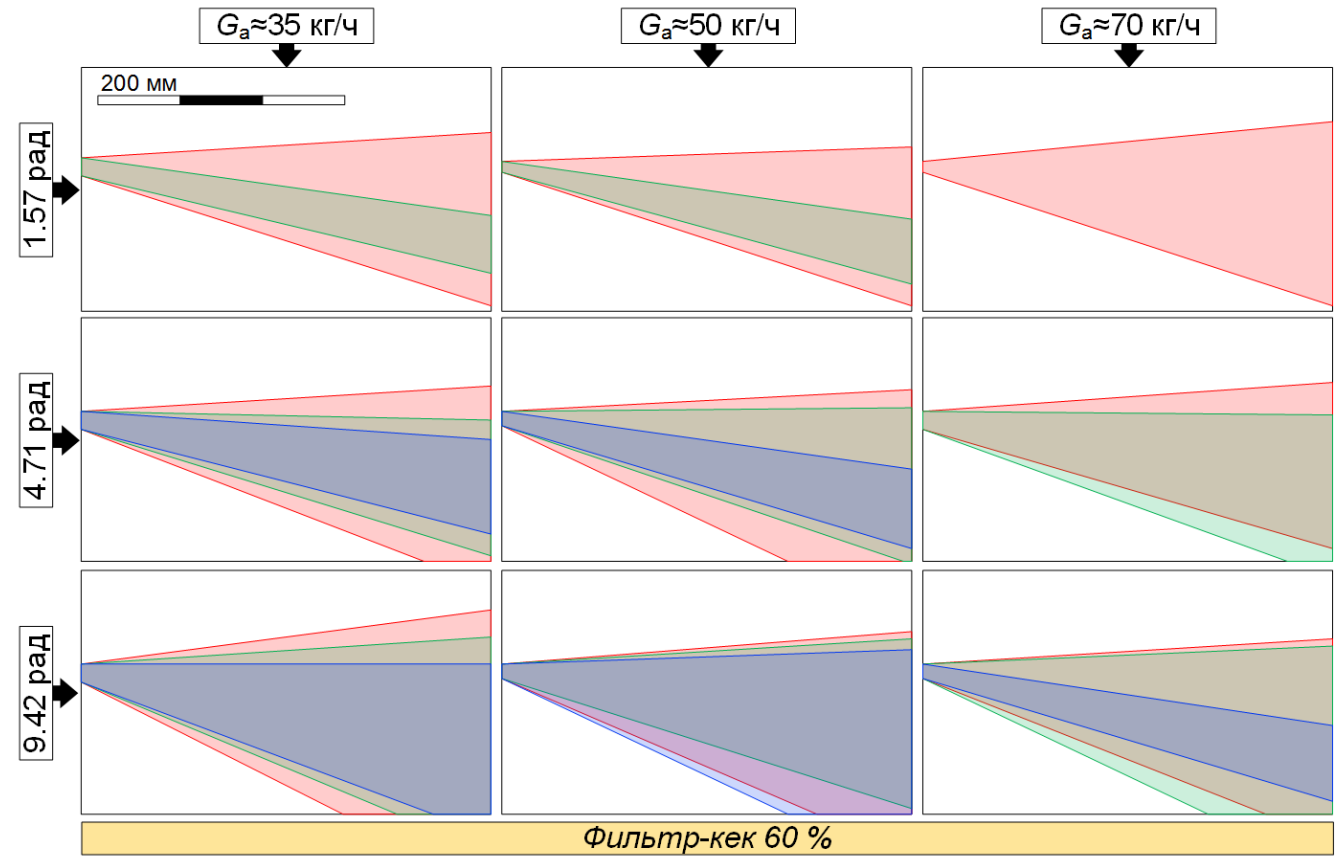
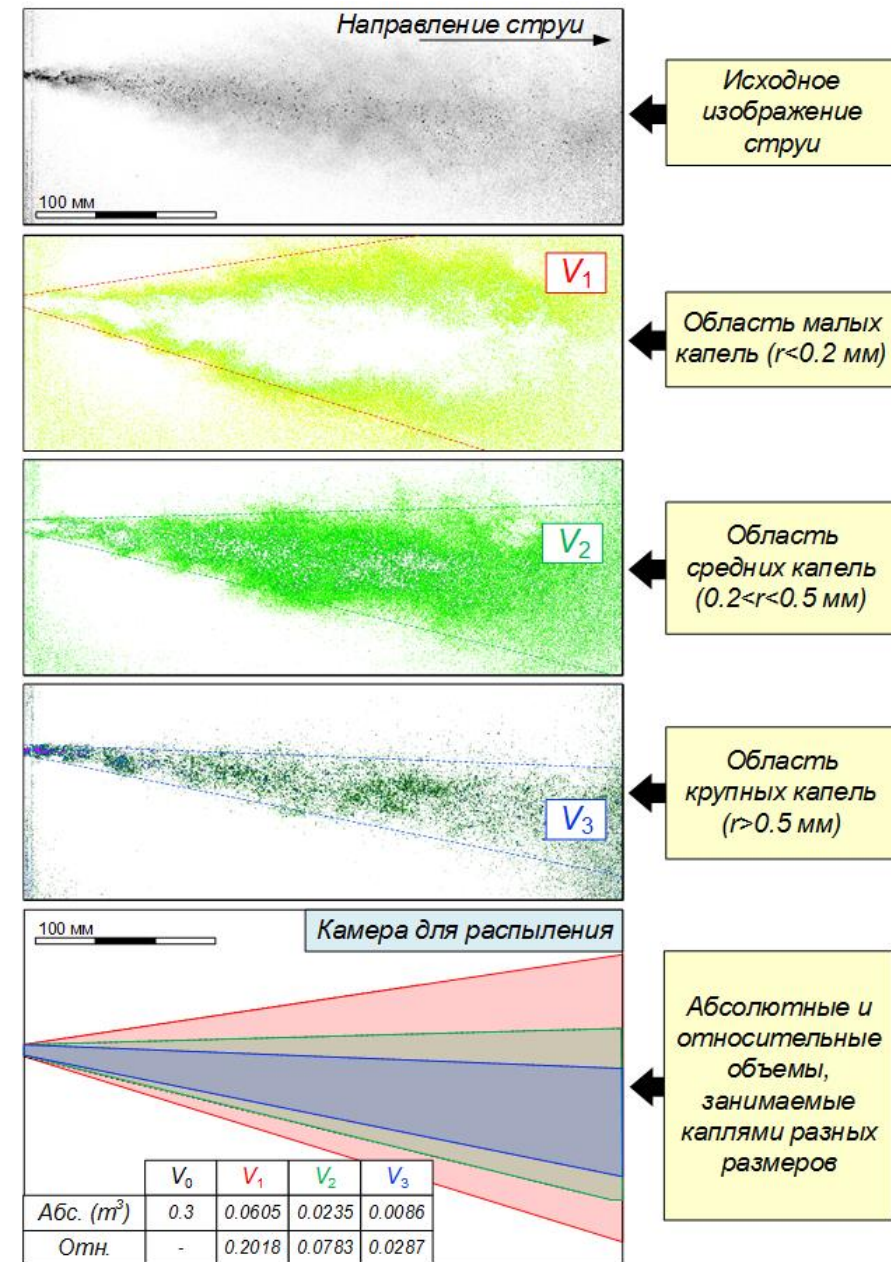


Рис. 6. Области, занимаемые различными по размерам каплями (красный – $R_d < 0.2$ мм; зеленый – $0.2 < R_d < 0.5$ мм; синий – $R_d > 0.5$ мм) суспензии, при различных расходах воздуха через распылительную форсунку, углах поворота распылительного устройства (для состава 60% кек, 40% вода).

ФРАГМЕНТАЦИЯ КАПЕЛЬ КЖТ. ПОДХОДЫ К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ

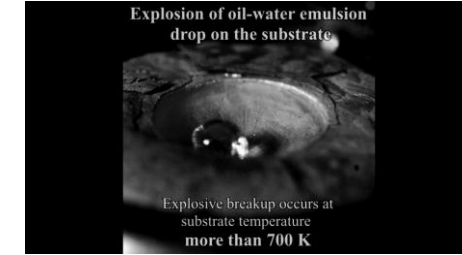
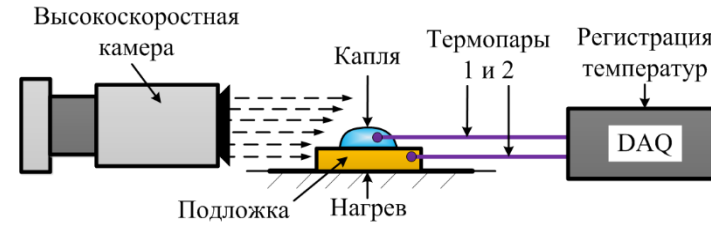
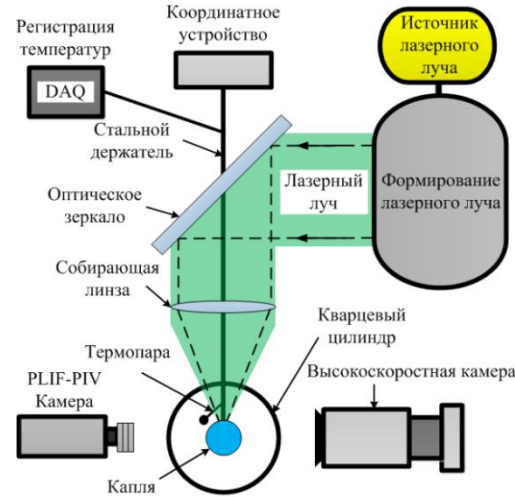


Рис. 9. Схема регистрации при нагреве на разогретой подложке.

Рис. 7. Схема регистрации при нагреве в потоке газов.

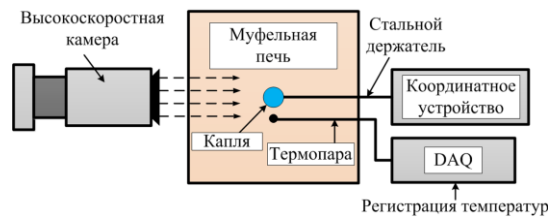
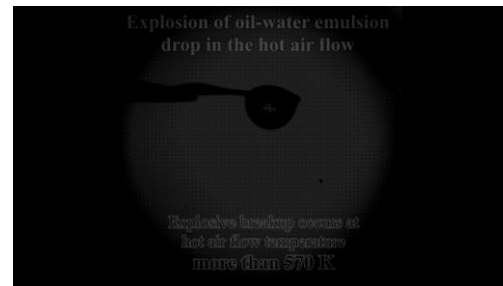


Рис. 8. Схема регистрации при нагреве в муфельной печи.

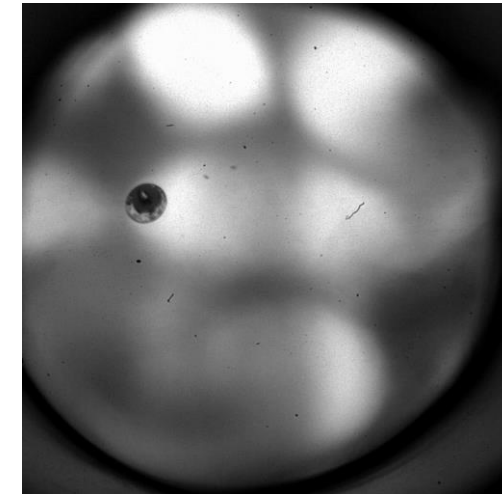
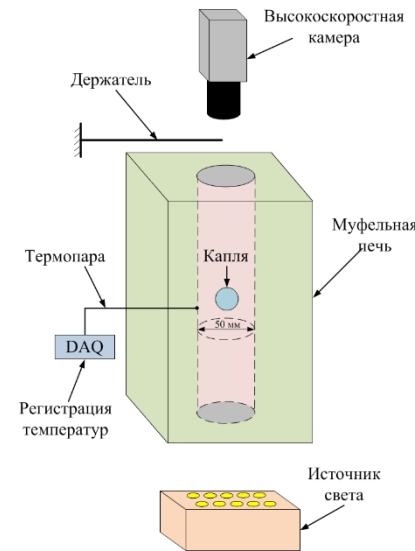
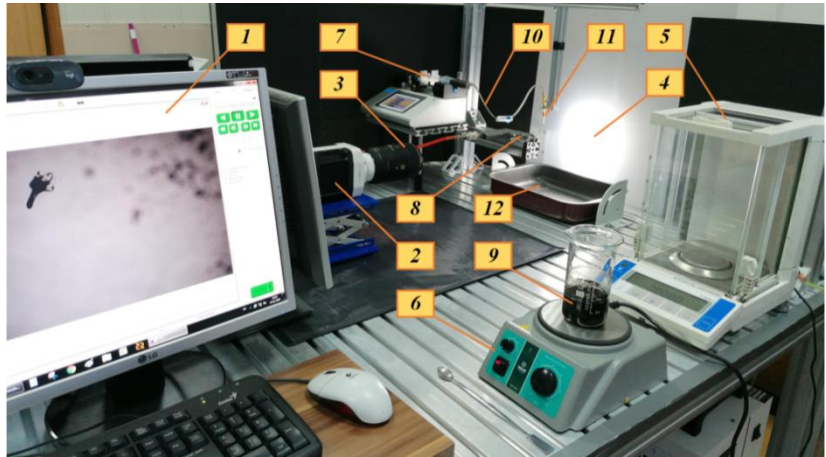


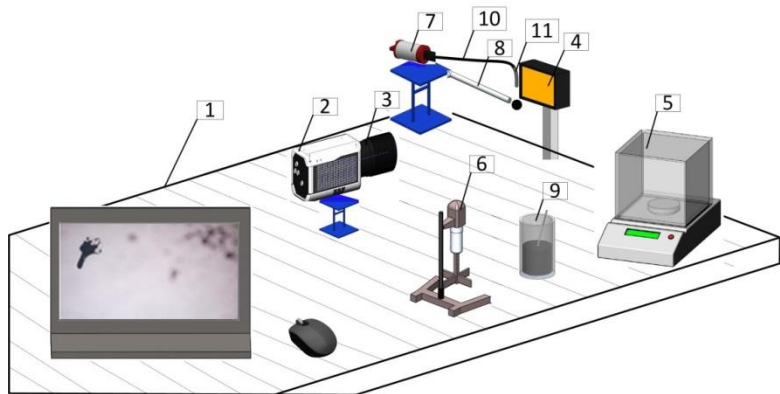
Рис. 10. Схема регистрации при свободном падении капли.

*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. 383. Pp. 378–387. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.01.006

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ

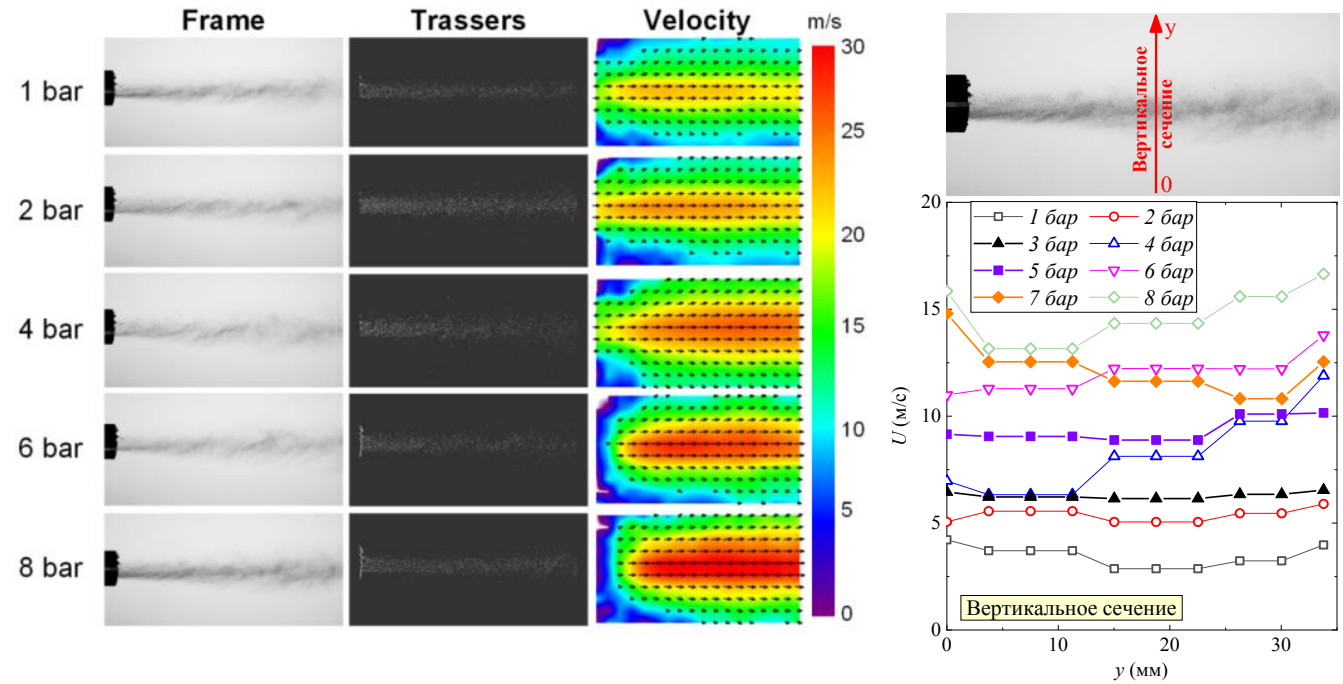


a



б

Рис. 11. Внешний вид (*a*) и схема (*б*) экспериментального стенда (1 – персональный компьютер; 2 – видеокамера; 3 – макрообъектив; 4 – светодиодный прожектор; 5 – лабораторные весы; 6 – лабораторная мешалка; 7 – шприцевой насос; 8 – сопло воздушного компрессора; 9 – исследуемый состав; 10 – канал подачи состава; 11 – дозирующий наконечник; 12 – емкость для сбора исследуемого состава).



a

б

Рис. 12. Видеogramмы потока воздуха на выходе сопла компрессора и соответствующие осредненные поля скорости потока воздуха (*a*), а также профили скорости потока в вертикальном сечении на расстоянии 30 мм от сопла (*б*) при различных скоростях движения воздушного потока.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

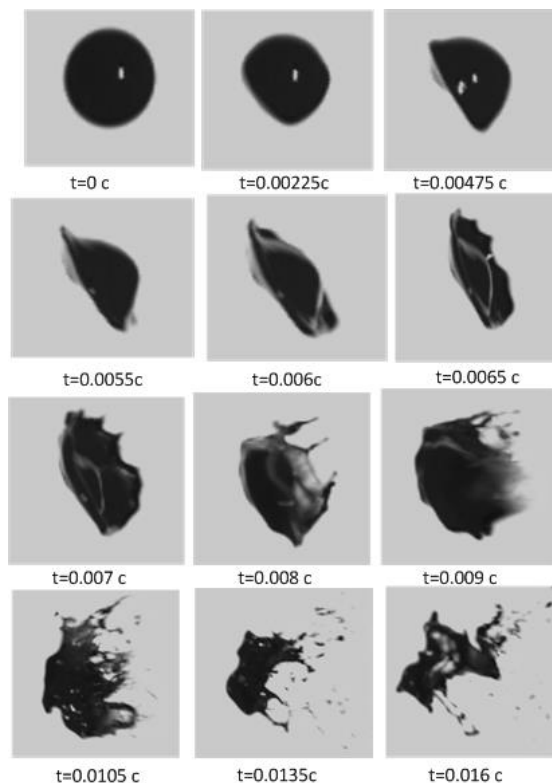


Рис. 13. Видеogramмы разрушения капли КЖТ (фильтр-кек угля марки Д 50%, вода 50%) при воздействии на нее воздушным потоком со скоростью около 15 м/с.

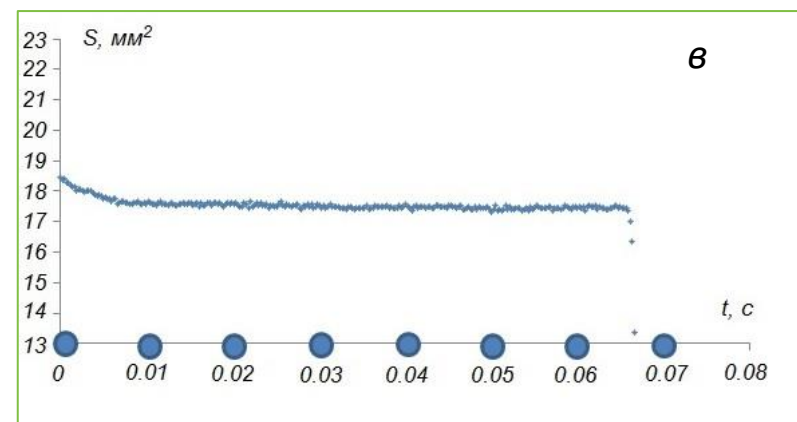
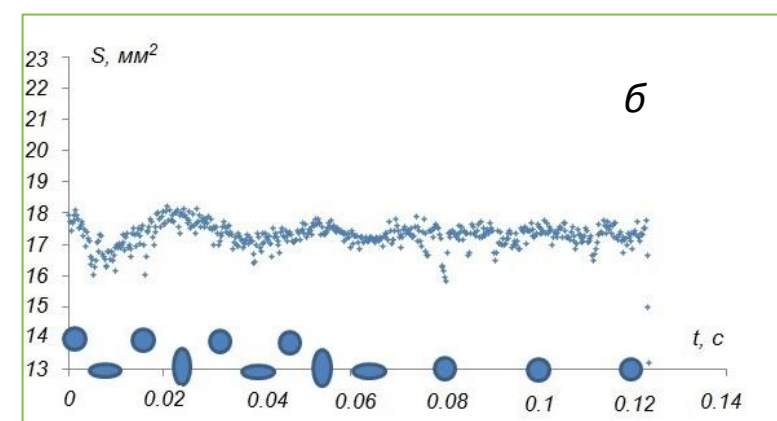
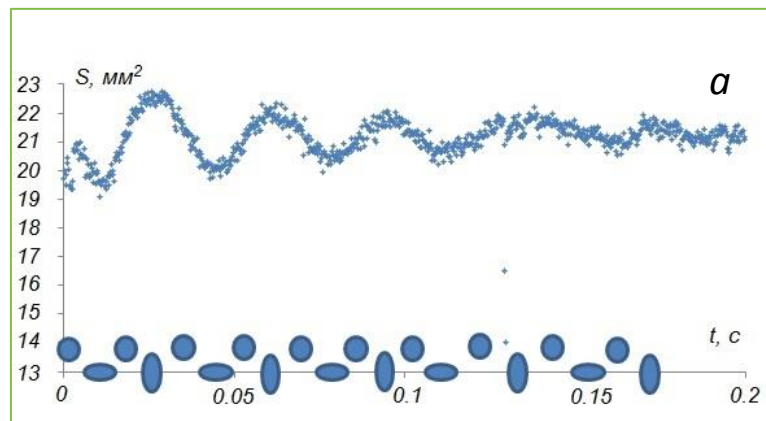


Рис. 14. Зависимости площади поверхности продольного сечения каплей КЖТ и их конфигурации от длительности гравитационного падения в неподвижном воздухе (а – фильтр-кек угля марки Д 50%, вода 50%; б – фильтр-кек угля марки Д 60%, вода 40%; в – фильтр-кек угля марки Д 85%, вода 15%).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

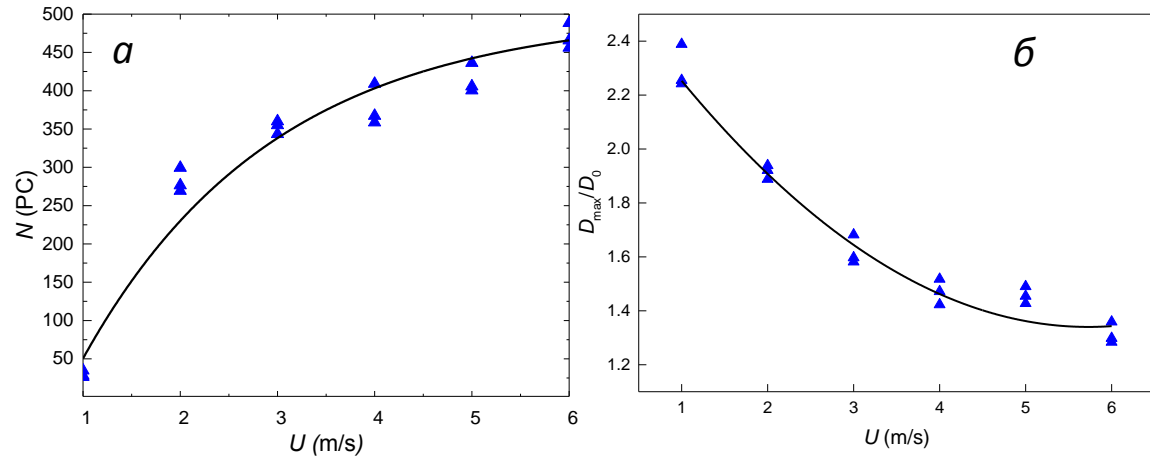


Рис. 15. Зависимости характеристик капле топливной суспензии «фильтр-кек угля марки Д 50%, вода 50%» от скорости воздушной струи: *а* – количество образовавшихся после дробления исходной капли фрагментов; *б* – соотношение максимального характерного размера капли в момент перед дроблением к начальному диаметру капли; *в* – средний размер вторичных фрагментов при разной скорости воздушной струи.

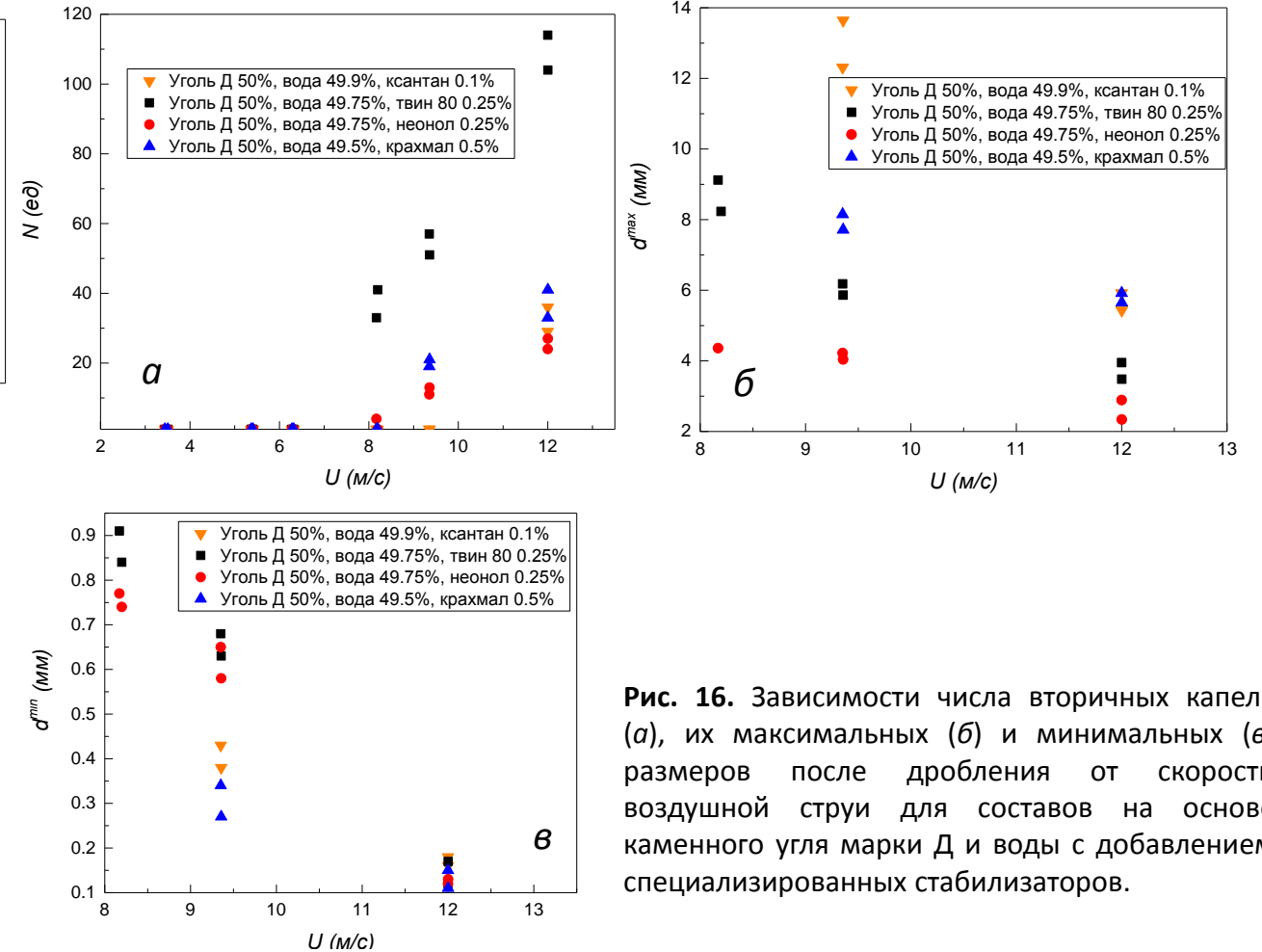
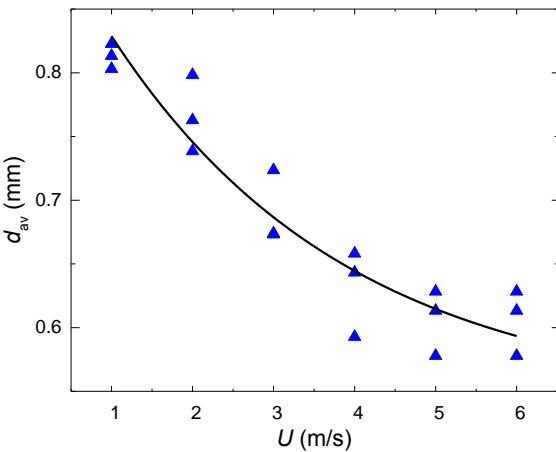


Рис. 16. Зависимости числа вторичных капле (а), их максимальных (б) и минимальных (в) размеров после дробления от скорости воздушной струи для составов на основе каменного угля марки Д и воды с добавлением специализированных стабилизаторов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

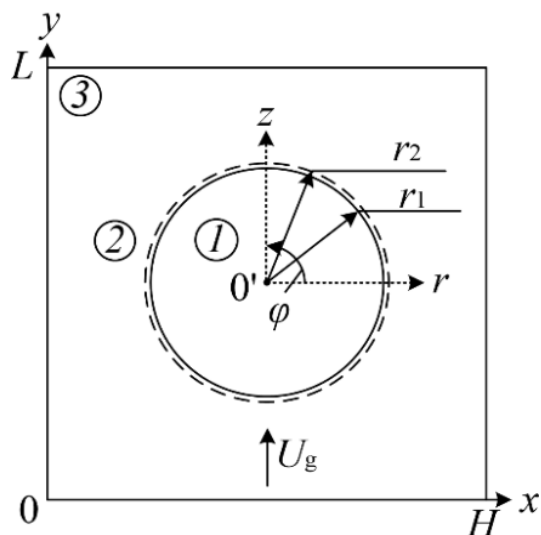


Рис. 17. Схема области решения: 1 – капля воды; 2 – водяной пар; 3 – высокотемпературные газы.

Для парогазовой смеси вокруг капли ($0 < x < H, 0 < y < L$):

уравнение Пуассона

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega \quad (1) \quad \omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2)$$

уравнение завихренности

$$\frac{\partial \omega}{\partial r} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} - v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \nu_2 \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \quad (3) \quad u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (4)$$

уравнение диффузии паров воды

$$\rho_1 \left(\frac{\partial C_w}{\partial t} + u \frac{\partial C_w}{\partial x} + v \frac{\partial C_w}{\partial y} \right) = \rho_1 D_1 \left(\frac{\partial^2 C_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_w}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

уравнение энергии $\frac{\partial T_2}{\partial t} + u \frac{\partial T_2}{\partial x} + v \frac{\partial T_2}{\partial y} = a_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right)$ (6)

уравнение баланса $C_w + C_g = 1$ (7)

Для капли воды ($0' < r < r_1, 0' < \phi < 2\pi$): уравнение энергии

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin(\phi)} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\sin(\phi) \frac{\partial T_3}{\partial \phi} \right) \right] + \frac{\partial H(r)}{\partial r} \quad (8)$$

Для парового буферного слоя ($r_1 < r < r_2, 0' < \phi < 2\pi$): уравнение энергии

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin(\phi)} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\sin(\phi) \frac{\partial T_2}{\partial \phi} \right) \right] + \frac{\partial H(r)}{\partial r} \quad (9)$$

Начальные условия ($t=0$):

$$T = T_0, C_w = 0, C_g = 1, u = v = 0 \text{ при } 0 < x < H, 0 < y < L; T = T_0 \text{ при } 0' < r < r_2, 0' < \phi < 2\pi. \quad (10)$$

Граничные условия при $t > 0$: $T = T_g, C_w = 0, C_g = 1, U = U_g$ при $y=0, 0 < x < H$;

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \frac{\partial^2 C_w}{\partial y^2} = 0, \frac{\partial^2 C_g}{\partial y^2} = 0 \text{ при } y=L, 0 < x < H; \quad (11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, C_w = 0, C_g = 0 \text{ при } x=0, 0 < y < L; \quad (12) \quad \frac{\partial T}{\partial t} = 0, C_w = 0, C_g = 0 \text{ при } x=H, 0 < y < L. \quad (13)$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

Томский

12

Краевые условия IV рода с учетом фазовых превращений и лучистого теплового потока на границе «жидкость – пар» в начальный момент времени

$$r=r_1, 0' < \phi < 2\pi, \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} - [Q_e W_e - H(r_1) + H_s(r_1)] \quad (14)$$

Краевые условия IV рода с учетом фазовых превращений и лучистого теплового потока на границе «жидкость–газ»

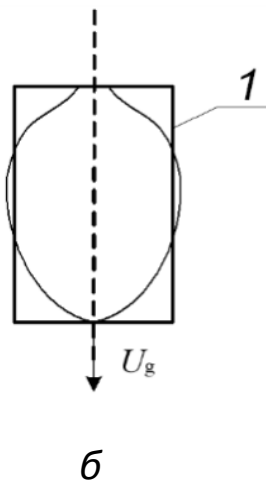
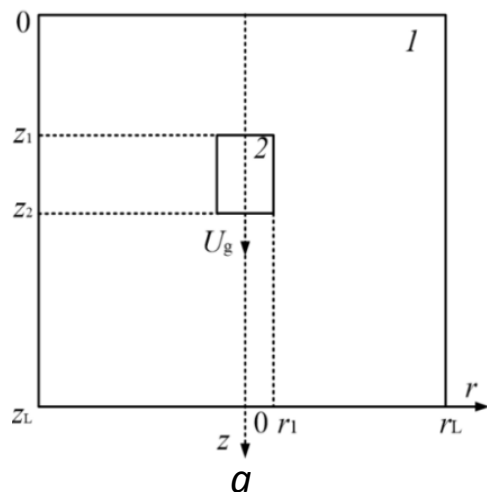
$$r=r_2, 0' < \phi < 2\pi, \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = H(r_2) + H_s(r_2) \quad (15)$$

Плотности радиационного теплового потока $H(r_2) = \varepsilon_1 \sigma [T_1^4 - T(r_2)^4]$, $H_s(r_2) = \varepsilon_1 \sigma T(r_2)^4$, $H(r_1) = H(r_2) \exp[-k_{\lambda 2}(r_2 - r_1)]$, $H(r) = H(r_1) \exp[-k_{\lambda i}(r_1 - r)]$ (16)

Динамика изменения радиуса капли

$$\frac{dr}{dt} = \frac{W_e}{\rho_1} \quad (17)$$

Переход от сферических форм к конфигурации капли, вытянутой в направлении движения цилиндров (рис. 18)



Уравнение энергии

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial T_1^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial T_1^2}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial H(r)}{\partial r} \quad (18)$$

Скорость конвекции в капле

$$\frac{1}{Fo} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial R^2} + L \frac{\partial \Theta}{\partial R} + Sr, \quad Fo = \frac{\lambda t_m}{\rho C r_m^2}, \quad L = \frac{\rho C u_m r_m}{\lambda}, \quad Sr_2 = \frac{r_m^2}{\lambda(T_m - T_0)} \frac{\partial^2 H(r)}{\partial r^2} \quad (19)$$

Скорость испарения

$$W_e = 1.5 \cdot 10^{-4} T_s \quad (20)$$

Балансное соотношение, учитывающее конвективный, кондуктивный и радиационный теплообмен на границе раздела «капля жидкости – газовая среда», реализацию эндотермического фазового превращения и нагрев формирующихся паров воды

$$W_e Q_e = \lambda \frac{\partial T}{\partial r} + \varepsilon \sigma (T_g^4 - T_s^4) + u \rho c (T_g - T_s) \quad (21)$$

Рис. 18. Схема области решения задачи испарения движущейся капли воды в форме вытянутого цилиндра (а): 1 – высокотемпературная газовая среда, 2 – капля. Условное изображение капли (б): 1 – внешний контур капли в форме цилиндра.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КАПЛИ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

Уравнение движения одиночной капли в потоке газа

$$m_d \frac{d\vec{u}_d}{dt} = \sum_i \vec{F}_i(x_i, t),$$

$$\frac{d\vec{x}_d}{dt} = \vec{u}_d, \quad \frac{d\vec{\omega}_{Id}}{dt} = \vec{I}_d$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления капли при малых значениях числа Рейнольдса

$$C_d = C_d^{\text{Stokes}} = \frac{24}{\text{Re}_d}$$

Основные факторы, влияющие на аэродинамическое сопротивление движущейся капли

Учёт циркуляционных микротечений, влияющих на аэродинамические характеристики

$$C_d = C_d^{\text{Stokes}} \frac{1 + \frac{2}{3} \mu_g / \mu_d}{1 + \mu_g / \mu_d}$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления с учётом турбулентности несущей среды

$$C_d = C_d^{\text{Stokes}} 162 \text{Tu}^{\frac{1}{3}} \text{Re}_d^{-1} \quad \text{при } \text{Re}_d < 50, 0.05 < \text{Tu} < 0.5$$

$$C_d = C_d^{\text{Stokes}} 0.133 \left(1 + \frac{150}{\text{Re}_d} \right)^{1.565} + 4 \text{Tu} \quad \text{при } 50 \leq \text{Re}_d \leq 700, 0.07 < \text{Tu} < 0.5$$

Сила аэродинамического сопротивления

$$(22) \quad F_A = C_d \rho_g \frac{\pi d_d^2}{4} \frac{|\vec{U}_g - \vec{U}_d| (U_g - U_d)}{2} \quad 13 \quad (24)$$

Число Рейнольдса для капли

$$(23) \quad \text{Re}_d = \frac{\rho_g d_d |U_g - U_d|}{\mu_g} \quad (25)$$

Для переходной области ($5 < \text{Re}_d < 1000$)

$$(26) \quad C_d = C_d^{\text{Stokes}} (1 + 0.15 \text{Re}_d^{0.687}) \quad (27)$$

Обтекание твёрдой частицы:

$$\mu_g / \mu_d \rightarrow 0, \mu_d \rightarrow \infty \quad \frac{1 + \frac{2}{3} \mu_g / \mu_d}{1 + \mu_g / \mu_d} = 1$$

Обтекание потоком жидкости газового пузырька:

$$(28) \quad \mu_g / \mu_d \rightarrow \infty, \mu_d \rightarrow 0 \quad \frac{1 + \frac{2}{3} \mu_g / \mu_d}{1 + \mu_g / \mu_d} = \frac{2}{3}$$

Степень турбулентности несущего потока

$$\text{Tu} = \frac{\sqrt{u_g^2}}{U_g} \quad (31)$$

Учёт сжимаемости газа при $\text{Re}_d / M \leq 100$

$$(29) \quad C_d = C_d^{\text{Stokes}} (1 + 0.15 \text{Re}_d^{0.687}) \frac{\left[1 + \exp\left(-\frac{0.427}{M^{4.63}} - \frac{3}{\text{Re}_d^{0.88}} \right) \right]}{1 + \frac{M}{\text{Re}_d} \left[3.82 + 1.28 \exp\left(-1.25 \frac{\text{Re}_d}{M} \right) \right]}, \quad (32)$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КАПЛИ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

$$M = \frac{U_{\text{гг}}}{c} = \frac{U_{\text{г}}}{\sqrt{kR_{\text{г}}T_{\text{г}}}}$$

Влияние концентрации капель в потоке на величину C_d (при $Re_d < 10^5$)

$$C_d = C_d^{\text{Stokes}} \frac{1}{(1-\Phi)^{3.75}} \left[1 + (1-\Phi)0.01Re_d \left(2.585 + \sqrt{1 + \frac{200}{(1-\Phi)Re_d}} \right) \right]$$

Объёмная концентрация дисперсной фазы

$$\Phi = \frac{V_d}{V_g}$$

Ускоренное движение капель увеличивает силу аэродинамического сопротивления

$$C_d = C_d^{\text{Stokes}} (A+1)^{1.2 \pm 0.03},$$

где $A = \frac{d}{U_d^2} \left(\frac{dU_d}{dt} \right)$ безразмерный комплекс, характеризующий относительное ускорение капель.

В случае замедленного движения капель применяют соотношение

$$C_d = 27Re_d^{-0.84}$$

В случае испарения движущихся в газовом потоке капель

$$C_d = \frac{C_{d0}}{1+B_s}$$

(33) Число переноса Сполдинга

$$B_s = \frac{c_g(T_g - T_d)}{Q_e + Q_d/W_d}$$

Гравитационное воздействие на каплю

$$F_G = \rho_d \frac{\pi d_d^3}{6} g \quad (40)$$

(34) Сила Сэффмена (подъёмная сила) вследствие неоднородности профиля скорости обтекающей каплю газового потока

$$F_S = k_s \left(\frac{\mu_g}{\rho_g} \right)^{1/2} d_d^2 (U_g - U_d) \left| \frac{\partial U_g}{\partial r} \right|^{1/2} \quad (41)$$

(35) Сила Магнуса вследствие вращательного движения капель за счёт соударения между собой и со стенками канала

$$F_M = k_M \rho_g \left(\frac{d_d}{8} \right)^2 \left[\Omega (U_g - U_d) \right] \quad (\text{при } Re_d \ll 1 \text{ и } Re_{\omega} = \rho_g |\bar{\omega}_d| d_d^2 / \mu_g \ll 1) \quad (42)$$

(36) Для промежуточных значений чисел Рейнольдса

$$F_M = k_M \rho_g \left(\frac{d_d}{8} \right)^2 |U_g - U_d| \frac{\Omega (U_g - U_d)}{\Omega} \quad (43)$$

Сила турбофореза возникает вследствие неоднородности профиля пульсационной скорости дисперсной фазы

$$(37) \quad F_T = -\frac{1}{2} \rho_d \frac{\pi d_d^3}{6} \frac{\partial v_d^2}{\partial r} \quad (44)$$

Сила термофореза возникает вследствие неоднородности профиля температуры несущей среды

$$(38) \quad F_t = -\frac{4.5 \mu_g^2 \lambda_g d_d}{\rho_g (2\lambda_g + \lambda_d)} \frac{\partial T_g}{\partial r} \quad (45)$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАСПАДА И ТРАНСФОРМАЦИИ КАПЛИ.

Критические условия распада при бинарных столкновениях

RS – рефлексивное разделение; SS – сдвиговое разделение [1, 2].

$$We_{RS} \geq \frac{3 \left[7(1 + \Delta^3)^{2/3} - 4(1 + \Delta^2) \right] (1 + \Delta^3)^2}{\Delta^2 \left[(2 - \alpha_2)(\Delta^3 \chi_L + \chi_S) - (1 + \Delta^3) \right]} \quad (46)$$

$$We_{RS} = \begin{cases} 643.10h + 14.8 & npu \quad Oh < 0.04 \\ 9309.00h^{1.7056} & npu \quad Oh \geq 0.04 \end{cases} \quad (47)$$

$$We_{SS} \geq \frac{4(1 + \Delta^3) \left[3(1 + \Delta)(1 - B)(\Delta^3 \chi_S + \chi_L) \right]^{1/2}}{(1 - \alpha_3) \Delta^2 B^2} \quad (48)$$

$$\Delta = \frac{d_{dS}}{d_{dL}}, \quad \chi_L = \begin{cases} 1 - \frac{(2 - \tau)^2(1 + \tau)}{4} & npu \quad h > \frac{d_{dL}}{2} \\ \frac{\tau^2(3 - \tau)}{4} & npu \quad h \leq \frac{d_{dL}}{2} \end{cases}, \quad \chi_S = \begin{cases} 1 - \frac{(2\Delta - \tau)^2(\Delta + \tau)}{4\Delta^3} & npu \quad h > \frac{d_{dS}}{2} \\ \frac{\tau^2(3\Delta - \tau)}{4\Delta^3} & npu \quad h \leq \frac{d_{dS}}{2} \end{cases}, \quad B = \frac{b}{r_{dS} + r_{dL}},$$

$$\tau = (1 - B)(1 + \Delta) \quad h = 0.5(d_{dL} + d_{dS})(1 - B)$$

[1] Hu C., Xia S., Li C., and Wu G. Three-dimensional numerical investigation and modeling of binary alumina droplet collisions. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2017. Vol. 113. Pp. 569–588.

[2] Finotello G., Kooiman R.F., Padding J.T., Buist K.A., Jongsma A., Innings F., and Kuipers J.A.M. The dynamics of milk droplet–droplet collisions. *Exp. Fluids*. 2018. Vol. 59. Article number 17.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАСПАДА И ТРАНСФОРМАЦИИ КАПЛИ.

Критические условия распада при воздействии газового потока

Скорость усиления двумерных волн Кельвина-Гельмгольца (пренебрегая вязкими эффектами жидкости) [1]



16

$$\omega_k = k_k \frac{\rho_l u_l + \rho_g u_g}{\rho_l + \rho_g} \pm i \frac{k_k}{\rho_l + \rho_g} \sqrt{\rho_l \rho_g (u_g - u_l)^2 - (\rho_l + \rho_g) \sigma_r k_k} \quad (49)$$

Волновое число, соответствующее максимальному возмущению [2]

$$k_{km} = \frac{2\rho_g u_g^2}{3\sigma_r} \quad (50)$$

Коэффициент усиления неустойчивости Кельвина-Гельмгольца [2]

$$\omega_{km1} = \frac{1}{6} \frac{2\rho_g u_g^2}{3\rho_l \sigma_r} \sqrt{\frac{1}{3} \rho_l \rho_g u_g^2} = \frac{\rho_g^{3/2} u_g^3}{9\sqrt{3} \rho_l^{1/2} \sigma_r} \quad (51)$$

Скорость усиления двумерных волн Рэлея-Тейлора (пренебрегая вязкими эффектами жидкости) [3]

$$\omega_R^2 = \frac{k_R (\rho_l - \rho_g) a - k_R^2 \sigma_r}{\rho_l + \rho_g} \quad (52)$$

Волновое число, соответствующее максимальному возмущению

$$k_{Rm} = \sqrt{\frac{\rho_l a}{3\sigma_r}} \quad (53)$$

Максимальное ускорение на основании выражения для аэродинамической силы

$$a = \frac{F_a}{m} = \frac{\frac{1}{2} \rho_g u_g^2 C_D \frac{\pi}{4} D_m^2}{\frac{1}{6} \pi D_0^3 \rho_l} = \frac{3}{4} \frac{\rho_g u_g^2 C_D D_m^2}{D_0^3 \rho_l} \quad (54)$$

Коэффициент усиления неустойчивости Рэлея-Тейлора [4]

$$\omega_{Rm} = \left(\frac{2}{3\sqrt{3}} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_l}{\sigma_r} \right)^{1/4} a^{3/4} \approx \left(\frac{2}{3\sqrt{3}} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_l}{\sigma_r} \right)^{1/4} \left(4.2 \frac{\rho_g u_g^2}{D_0 \rho_l} \right)^{3/4} \quad (55)$$

$$\omega_{km1} / \omega_{Rm} = \frac{\frac{\rho_g^{3/2} u_g^3}{9\sqrt{3} \rho_l^{1/2} \sigma_r}}{\left(\frac{2}{3\sqrt{3}} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_l}{\sigma_r} \right)^{1/4} \left(4.2 \frac{\rho_g u_g^2}{D_0 \rho_l} \right)^{3/4}} \approx 0.0352 We_r^{3/4}$$

Критерий Вебера, соответствующий разрушению капли [5] $We_r = 87.3$

(56)

[1] S. Chandrasekhar. Hydrodynamics and hydromagnetic stability, Oxford University (1961).

[2] P. Marmottant, E. Villermaux. On spray formation. J Fluid Mech, 498 (1) (2004), pp. 73-111.

[3] C.M. Varga, J.C. Lasheras, E.J. Hopfinger. Initial breakup of a small-diameter liquid jet by a high-speed gas stream. J Fluid Mech, 497 (2003), pp. 405-434.

[4] Z. Dai, G.M. Faeth. Temporal properties of secondary drop breakup in the multimode breakup regime. Int J Multiphase Flow, 27 (2) (2001), pp. 217-236.

[5] Hui Zhao, Zhao-Wei, Wu Wei-Feng, Li Jian-Liang Xu, Hai-Feng Liu. Transition Weber number between surfactant-laden drop bag breakup and shear breakup of secondary atomization. Fuel. 221 (2018), pp. 138-143.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

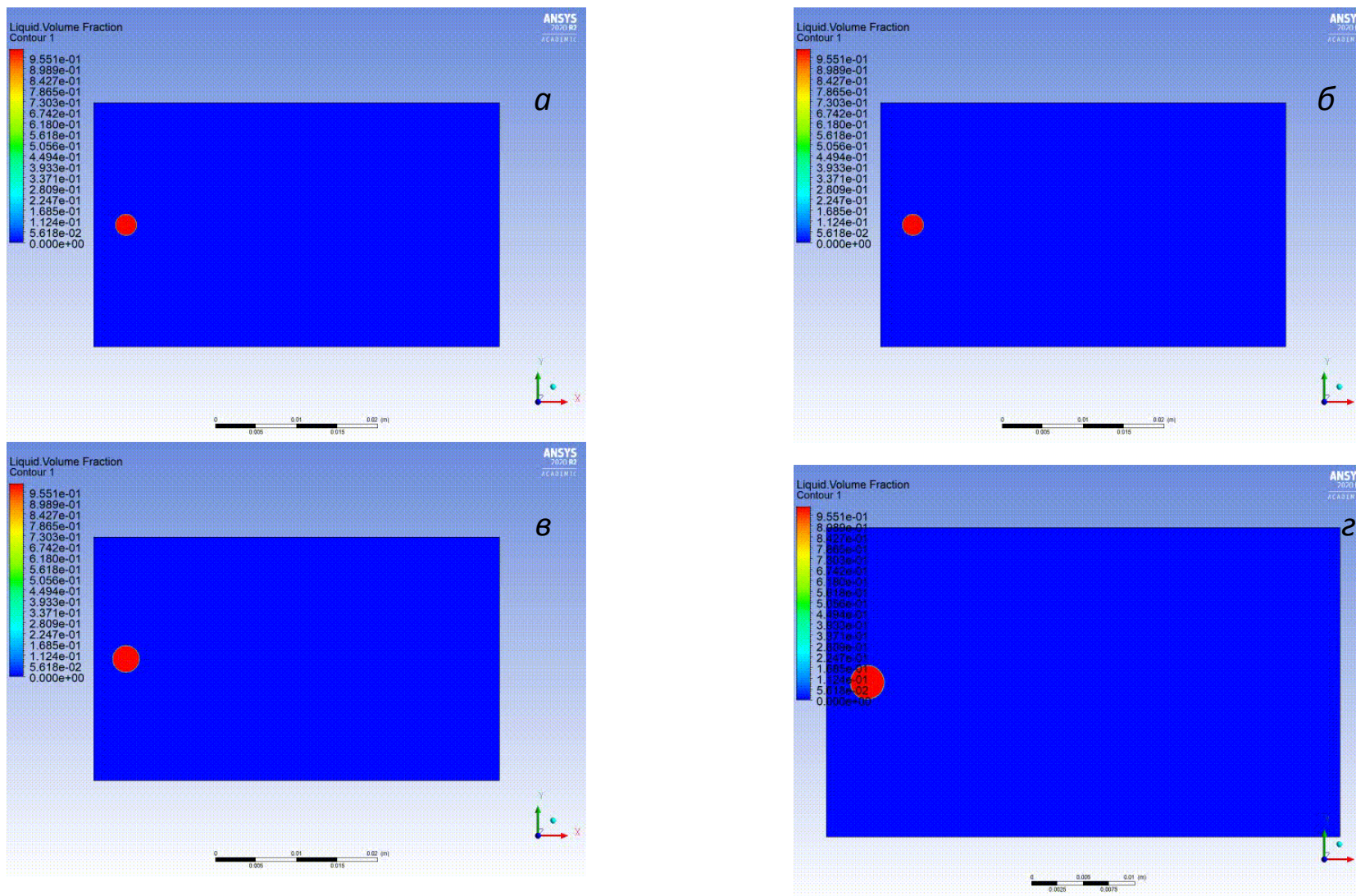


Рис. 19. Моделирование распада капли высоковязкой жидкости под действием газовой струи: *а* – $Rd_0 = 1.323$ мм, $U_g = 50$ м/с; *б* – $Rd_0 = 1.323$ мм, $U_g = 100$ м/с; *в* – $Rd_0 = 1.663$ мм, $U_g = 50$ м/с; *г* – $Rd_0 = 1.663$ мм, $U_g = 100$ м/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

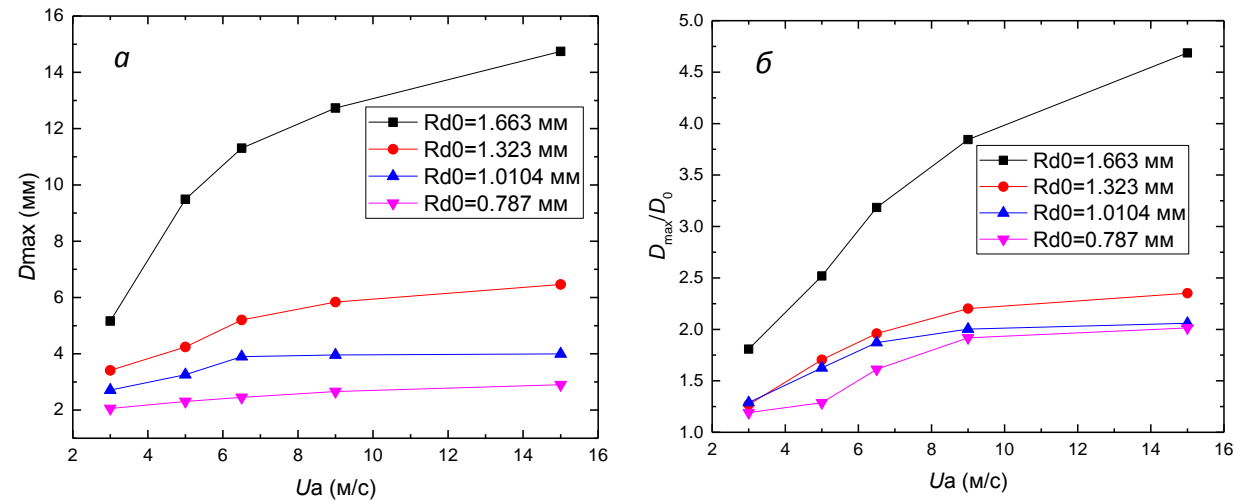


Рис. 20. Зависимости основных характеристик фрагментации капель высоковязкой жидкости от скорости воздушного потока: *а* – максимальный характерный размер капли перед дроблением; *б* – соотношение D^{max} / D_0 .

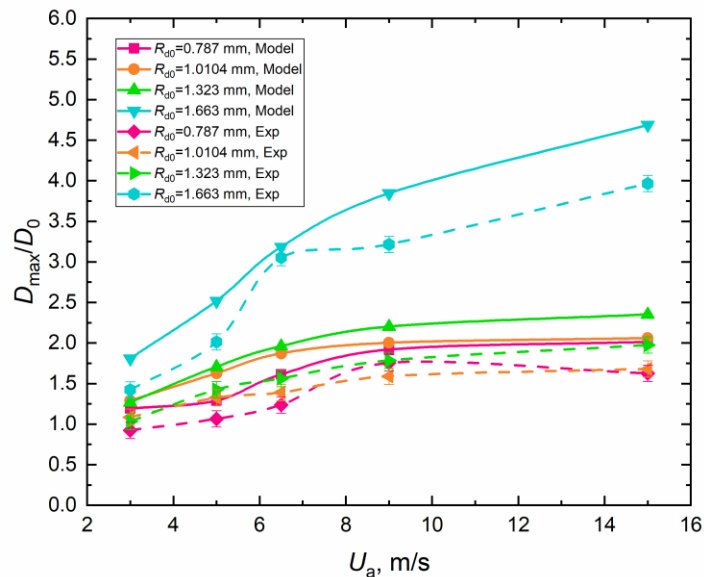


Рис. 21. Зависимости соотношения D^{max} / D_0 от скорости газового потока для разных условий: сопоставление результатов экспериментальных и теоретических исследований.

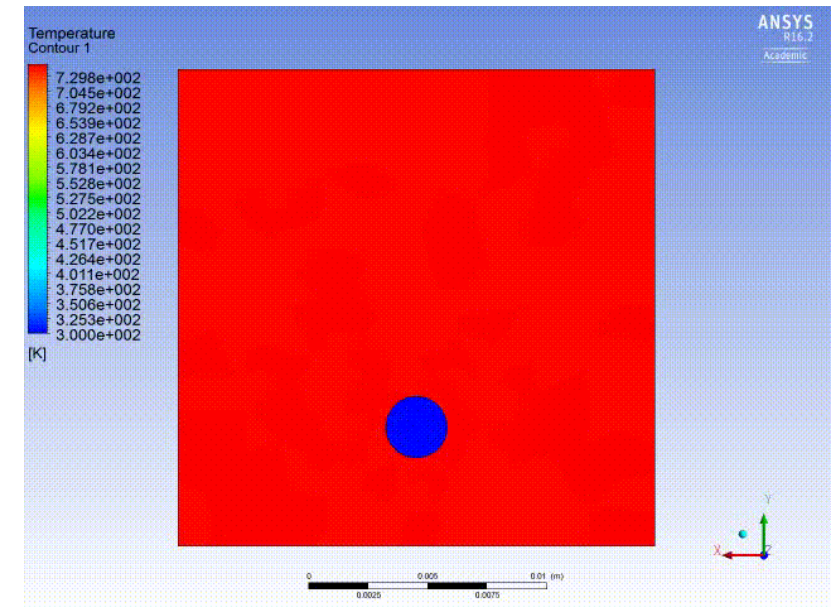


Рис. 22. Температурное поле одиночной сферической капли жидкости при движении в разогретой газовой среде.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ



Рис. 23. Значения критических чисел Вебера (a), увеличения диаметра капли относительно исходного (b), произведения критических значений критериев Вебера и Рейнольдса (v), соответствующие условиям фрагментации капель топливных суспензий: 1 - Фильтр-кек угля марки Д 50%, вода 50%; 2 - Фильтр-кек угля марки Д 40%, вода 60%; 3 - Каменный уголь марки Д 50%, вода 50%; 4 - Каменный уголь марки Д 40%, вода 60%; 5 - Каменный уголь марки Д 45%, вода 55%; 6 - Бурый уголь марки Б2 40% (80 мкм), вода 60%; 7 - Бурый уголь марки Б2 40% (100 мкм), вода 60%; 8 - Бурый уголь марки Б2 40% (140 мкм), вода 60%; 9 - Фильтр-кек угля марки Д 50%, вода 47.5%, турбинное масло 2.5%; 10 - Фильтр-кек угля марки Д 50%, вода 50%, турбинное масло 5%; 11 - Фильтр-кек угля марки Д 50%, вода 40%, турбинное масло 10%; 12 - Фильтр-кек угля марки Д 37%, вода 61%, древесные опилки 2%; 13 - Фильтр-кек угля марки Д 35%, вода 61%, древесные опилки 4%; 14 - Фильтр-кек угля марки Д 50%, вода 45%, арахисовая шелуха 5%; 15 - Каменный уголь марки Д 50%, вода 49.75%, неонол 0.25%; 16 - Каменный уголь марки Д 50%, вода 49%, неонол 1%; 17 - Каменный уголь марки Д 50%, вода 49.75%, твин 0.25%; 18 - Каменный уголь марки Д 50%, вода 49.5%, кукурузный крахмал 0.5%.

Критические условия распада капель [1]

Вибрационное дробление, дробление по типу «парашют» и «парашют со струйкой»

$$\left\{ \begin{array}{l} 4 \leq We \leq 20 \\ 0.1 \leq WeRe^{-0.5} \leq 0.8 \end{array} \right\}$$

Срывной тип дробления

$$\left\{ \begin{array}{l} 10 \leq We \leq 10^4 \\ 0.5 \leq WeRe^{-0.5} \leq 10 \end{array} \right\}$$

Взрывной тип дробления

$$\left\{ \begin{array}{l} 10^3 \leq We \leq 10^5 \\ 10 \leq WeRe^{-0.5} \leq 10^2 \end{array} \right\}$$

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Исследования выполнены в рамках выполнения крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития в рамках подпрограммы «Фундаментальные научные исследования для долгосрочного развития и обеспечения конкурентоспособности общества и государства» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» (**Соглашение № 075-15-2020-806 (Договор № 13.1902.21.0014)**)