

01.1;03.2

## Охлаждение парогазовой смеси испаряющимися каплями воды: зависимость времени охлаждения от начальной температуры парогазовой смеси

© Н.М. Корценштейн

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия  
E-mail: naumkor@yandex.ru

Поступило в Редакцию 1 сентября 2022 г.

В окончательной редакции 10 января 2023 г.

Принято к публикации 10 января 2023 г.

Проведено численное моделирование охлаждения парогазовой смеси испаряющимися каплями воды. Предложено выражение с использованием характеристической температуры, определяющее зависимость времени охлаждения от начальной температуры смеси. Представлена методика определения характеристической температуры на основе результатов численного моделирования. Выполнена оценка погрешности результатов использования полученных выражений.

**Ключевые слова:** парогазовая смесь, термическая релаксация, численное моделирование, нагрев и испарение капель, время охлаждения парогазовой смеси, характеристическая температура.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.06.54809.19351

Среди многочисленных направлений использования процесса испарения капель [1] можно выделить два направления, наиболее близких к теме настоящей работы. В первом из них процесс испарения используется для быстрого охлаждения капель, в том числе при получении наночастиц методом LPSP (low-pressure spray pyrolysis) [2,3]. Во втором процесс испарения капель используется для быстрого охлаждения несущего парогазового потока. Именно таким образом предлагается охлаждать продукты конверсии метана для предотвращения образования сажи [4]. Еще одно направление — стабилизация теплового режима процесса термической переработки древесной биомассы (торрефикации), включающей экзотермическую стадию [5,6]. Одним из решений может быть мелкодисперсный распыл охлаждающей воды в объеме секции охлаждения торрефицированных пеллет. При этом эндотермический процесс испарения капель сбалансирован тепловыделением в экзотермической реакции. Для оценки возможности такого решения востребованы оценки времени охлаждения газа испаряющимися каплями воды. В литературе имеется значительное число работ с решением задач теплообмена в газовых потоках с испаряющимися каплями, например [2,4,7,8]. Однако их результаты не обобщены в виде соотношений, позволяющих оценить время охлаждения парогазовой смеси испаряющимися каплями воды в зависимости от ее начальной температуры и температурного интервала охлаждения. Получение таких соотношений стало целью настоящей работы.

Постановка задачи соответствовала использованной в [9,10]: рассматривался поток горячей парогазовой смеси и холодных капель воды. Поток стационарный, ламинарный и односкоростной. Методика решения состояла в численном моделировании процесса термической релак-

сации в газочапельном потоке с последующим анализом и обобщением результатов численного моделирования.

Аналогично [10] использованная математическая модель процесса установления теплового равновесия (термической релаксации) в потоке включала уравнения неразрывности и энергии для газа, пара и капель:

— массовая доля газа постоянна, а изменение массовых долей пара и капель связано условием баланса

$$\frac{dg_g}{dt} = 0, \quad \frac{dg_v}{dt} = -\frac{dg_d}{dt}; \quad (1)$$

— в процессе охлаждения газа число капель не меняется, и для монодисперсного распределения изменение массовой доли капель определяется изменением массы и радиуса одной капли

$$\frac{dg_d}{dt} = \frac{3g_d}{r_d} \frac{dr_d}{dt}; \quad (2)$$

— температура капель определяется интенсивностью процесса испарения капель и их нагревом при теплообмене с паром и газом

$$g_d c_{pd} \frac{dT_d}{dt} = \frac{dg_d}{dt} (L(T_d) + c_{pv}(T_{vg} - T_d)) + Q_{vg-d}, \quad (3)$$

$$(g_v c_{pv} + g_g c_{pg}) \frac{dT_{vg}}{dt} = -Q_{vg-d}. \quad (4)$$

Здесь учтено, что для стационарного потока  $u \frac{d}{dx} = \frac{d}{dt}$ , где  $x$  и  $u$  — координата и скорость вдоль оси потока,  $g_i$ ,  $c_{pi}$ ,  $T_i$  — соответственно массовая доля, изобарная теплоемкость, температура  $i$ -го компонента смеси пар-газ-капли;  $r_d$  — радиус капли,  $L(T_d)$  — теплота испарения при температуре капли,  $Q_{vg-d}$  — количество

тепла, передаваемого от пара и газа каплям в единице массы смеси за единицу времени,

$$Q_{vg-d} = \left( \frac{3g_d}{\rho_1 r_d^2} \right) \frac{\text{Nu}}{2} \lambda_{vg} (T_{vg} - T_d). \quad (5)$$

Здесь  $\lambda_{vg}$  — коэффициент теплопроводности парогазовой смеси, Nu — число Нуссельта, при использованном одностороннем приближении (капли вмерозены в поток) Nu = 2.

Выражение для скорости испарения капель (с начальным радиусом  $\sim 10 \mu\text{m}$ ) в диффузионном режиме с учетом стефановского течения, возникающего из-за присутствия в смеси неконденсирующегося газа, выбрано в виде [11]:

$$\frac{dr_d}{dt} = -\frac{\rho_{vg} D_{vg}}{\rho_1 r_d} \left( \ln \frac{1 - \alpha_1}{1 - \alpha_2} \right), \quad (6)$$

где

$$\alpha_1 = \frac{\rho_{\Sigma} g_v}{\rho_{vg}}, \quad \alpha_2 = \frac{\rho_v^s}{\rho_{vg}}, \quad \rho_{vg} = \rho_{\Sigma} \left( g_v + g_g \frac{\mu_v}{\mu_g} \right), \quad (7)$$

$\rho_i$  и  $\mu_i$  — плотность и молярная масса  $i$ -го компонента смеси,  $\rho_v^s$  — плотность пара в состоянии насыщения,  $D_{vg}$  — коэффициент диффузии молекул пара в парогазовой смеси. Индексы  $v, g, d, l, \Sigma$  относятся соответственно к пару, газу, каплям, веществу капли и смеси в целом. Аналогичная модель испарения нагреваемых капель воды использована в [12]. В отличие от настоящей работы нагревание капель в [12] осуществлялось лазерным облучением, а температура окружающего газа (атмосферного воздуха) считалась постоянной.

Принятые допущения в модели термической релаксации (быстрое выравнивание температур пара и газа в межмолекулярных столкновениях, что позволяет использовать для газовой фазы одно уравнение энергии; однородность температурного профиля внутри испаряющихся капель; квазистационарность процесса испарения капель) и соответствующие им временные ограничения обсуждались в предыдущей работе [10]. Подтверждена корректность их использования.

Для решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений (1)–(4), (6) был применен метод Кутты–Мерсона с автоматическим выбором шага и использована авторская программа COND-KINET-1 [13]. Параметр TOL, определяющий необходимость дробления шага, выбирался таким, что дальнейшее его уменьшение не изменяло результаты решения. Численное моделирование процесса охлаждения проведено для парогазовой смеси водяной пар–азот с начальным массовым содержанием пара от 0 до 100%. Начальная температура капель воды составляла 293 К. Необходимые справочные материалы по свойствам азота, водяного пара и воды взяты из [14]. Варьируемыми величинами были начальные значения температуры парогазовой смеси  $T_{vg}^0$ , массовой доли капель  $g_d^0$  и водяного пара  $g_v^0$ , что определяло

начальную концентрацию водяного пара в газовой фазе  $g_{vgf}^0 = g_v^0 / (1 - g_d^0)$ . Определены временные зависимости (вдоль оси потока) температуры парогазовой смеси, а также массы и температуры капель. На основании результатов расчетов получены времена охлаждения парогазовой смеси в заданном температурном интервале при изменении варьируемых параметров в интервале значений  $g_d^0$  (0; 0.5; 1),  $g_{vgf}^0$  (0; 0.5; 1),  $T_{vg}^0$  (823–1573 К),  $\Delta T = T_{vg}^0 - T_{vg}$  (100–400 К). Как показал анализ, зависимость полученных данных от начальной температуры парогазовой смеси может быть представлена в виде

$$\Delta t = \Delta t_{973} \exp \left( \Theta \left( \frac{1}{T_{vg}^0} - \frac{1}{973} \right) \right), \quad (8)$$

где  $\Theta$  — характеристическая температура,  $\Delta t_{973}$  — время охлаждения при  $T_{vg}^0 = 973$  К, определяемое согласно выражению

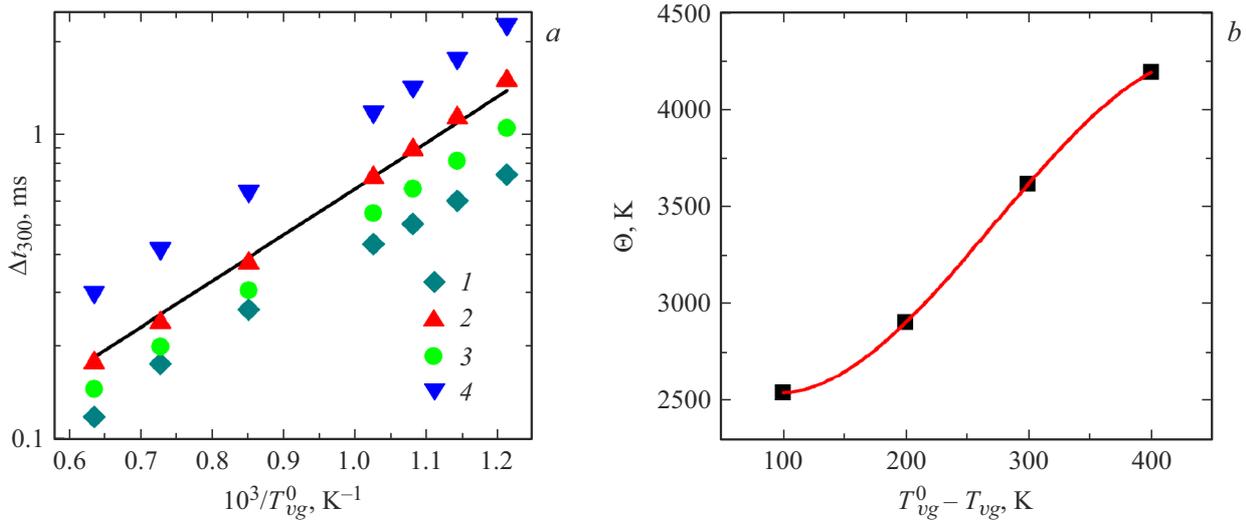
$$\Delta t_T = A (r_d^0 / 10)^2 \left( g_d^0 / (1 - g_d^0) \right)^{-n}. \quad (9)$$

Связь  $\Delta t_{973}$  с начальным составом парогазовой смеси и температурным интервалом охлаждения определена в [10] через зависящие от  $g_{vgf}^0$  коэффициенты полиномиальных разложений для  $A$  и  $n$  по параметру  $Y = \Delta T / 1000$ , найденные при  $T_{vg}^0 = 973$  К. Характеристическая температура  $\Theta$  в принципе также зависит от величин  $g_d^0$ ,  $g_{vgf}^0$  и  $\Delta T$ . Для упрощения практического использования выражения (8) была сделана попытка для каждого значения  $\Delta T$  определять  $\Theta$  из анализа данных для всего интервала изменения величин  $g_d^0$ ,  $g_{vgf}^0$  и  $T_{vg}^0$ , т.е. проверялась возможность не учитывать зависимость  $\Theta$  от начального состава парогазовой смеси. С этой целью данные по времени охлаждения для каждого значения  $\Delta T$  и всего спектра значений начального состава смеси откладывались на графике в координатах  $\lg(\Delta t) - 1/T_{vg}^0$  с последующей линейной аппроксимацией. Коэффициент при линейном члене определял искомое значение  $\Theta$ . Использованный подход иллюстрирует рис. 1, а. Найденные значения  $\Theta$  (рис. 1, б) аппроксимированы полиномом третьей степени по параметру  $Y = \Delta T / 1000$

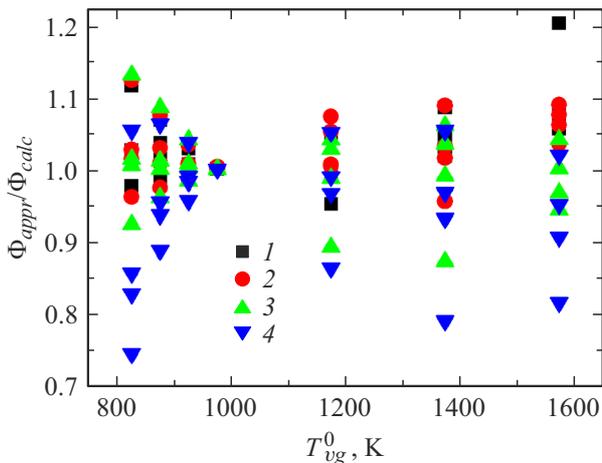
$$\Theta = 10^3 \left( \sum_{i=0}^{i=3} \Theta_i Y^i \right). \quad (10)$$

Коэффициенты аппроксимации приведены в таблице.

Проверка предложенного подхода проведена путем сравнения двух значений величины  $\Phi = \Delta t(T_{vg}^0) / \Delta t_{973}$ :  $\Phi_{appr}$ , полученных с использованием выражений (8), (10), а также  $\Phi_{calc}$ , полученных непосредственно по результатам расчета. Значения отношения  $\Phi_{appr} / \Phi_{calc}$  представлены на рис. 2. Относительная погрешность результатов использования предложенного подхода для вычисления времени охлаждения парогазовой смеси в



**Рис. 1.** *a* — время охлаждения парогазовой смеси при  $\Delta T = 300$  К в зависимости от начальной температуры парогазовой смеси. Символы — результаты вычислений для различных значений начальной массовой доли капель и начальных составов парогазовой смеси (1 —  $g_d^0 = 0.5, g_{vgf}^0 = 0$ ; 2 —  $g_d^0 = 0.5, g_{vgf}^0 = 0.999$ ; 3 —  $g_d^0 = 0.5, g_{vgf}^0 = 0.5$ ; 4 —  $g_d^0 = 0.333, g_{vgf}^0 = 0.5$ ), сплошная линия — аппроксимация согласно (8) для определения характеристической температуры. *b* — характеристическая температура в зависимости от величины температурного интервала. Символы — результаты обработки результатов вычислений, сплошная линия — аппроксимация согласно (10).



**Рис. 2.** Результаты использования выражений (8), (10) в зависимости от начальной температуры парогазовой смеси для различных значений величины температурного интервала.  $\Delta T = 100$  (1), 200 (2), 300 (3) и 400 К (4).

зависимости от ее начальной температуры, согласно (8) и (10), определялась как

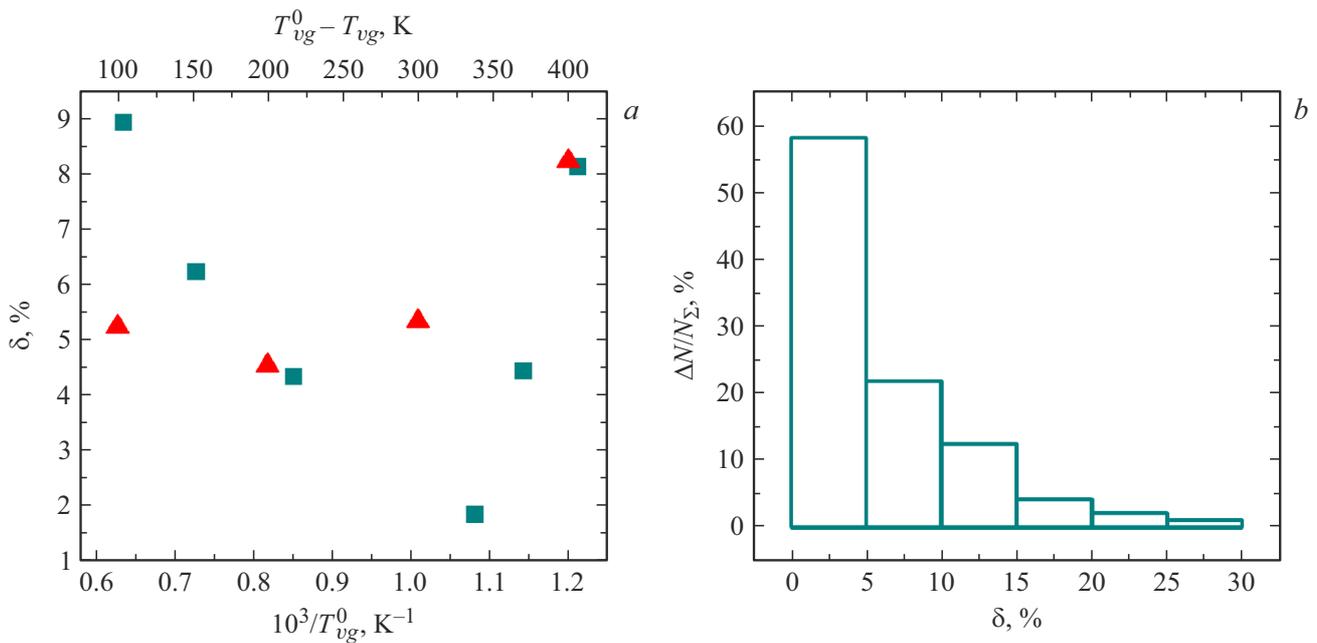
$$\delta = \frac{|\Phi_{appr} - \Phi_{calc}|}{\Phi_{calc}} \cdot 100\%. \quad (11)$$

Обработка результатов, представленных на рис. 2 (96 значений), позволила получить данные о погрешности результатов использования выражений (8), (10) в зависимости от начальной температуры парогазовой смеси (осреднение по  $\Delta T$ , квадраты) и величины температурного интервала (осреднение по  $T_{vg}^0$ , треугольники)

Коэффициенты полиномиального разложения в выражении (10)

$\Theta_0, K$	$\Theta_1, K$	$\Theta_2, K$	$\Theta_3, K$
3.0149	-10.4825	65.72	-80.45

(рис. 3, *a*). Распределение результатов применения выражений (8), (10) по достигаемой погрешности представлено на рис. 3, *b*, где  $\Delta N$  — число результатов вычисления согласно (11), для которых погрешность не превышала значения для данного интервала  $\delta$ ,  $N_{\Sigma}$  — общее число результатов расчета (96 значений). Видно, что предложенный подход с использованием выражения (8), в котором характеристическая температура  $\Theta$ , определяющая температурную зависимость времени охлаждения, зависит только от температурного интервала охлаждения  $\Delta T$ , дает результаты со средней погрешностью в пределах 10% и максимальной погрешностью 25%. Можно предположить, что использование аппроксимационного выражения (8) для условий, отличающихся от тех, для которых оно было получено ( $T_{vg}^0 = 823-1573$  К,  $\Delta T = 100-400$  К,  $r_d^0 \leq 10 \mu m$ ), даст результаты с большей погрешностью. Для проверки были использованы расчетные данные по охлаждению газа испаряющимися каплями, представленные в работе [2]. Согласно [2], время охлаждения газа на  $\Delta T = 20$  К в газокapельном потоке с начальной температурой  $T_{vg}^0 = 296$  К и массовым содержанием  $g_d^0/(1 - g_d^0) = 0.03$  капель микронного размера (более точно в [2] не указано) составляет 10 ms. Это же величина, определенная с использованием выражений (8)–(10) и данных таблицы, для  $r_d^0 = 1-2 \mu m$



**Рис. 3.** *a* — относительная погрешность результатов использования выражений (8), (10) в зависимости от начальной температуры парогазовой смеси (квадраты) и величины температурного интервала (треугольники). *b* — распределение результатов применения выражений (8), (10) по достигаемой погрешности.

составляет 3.5–14 ms. С учетом отличия условий (по значениям  $T_{vg}^0$  и  $\Delta T$ ) в [2] и настоящей работе, а также неопределенности в величине  $r_d^0$  результат использования полученных выражений (8)–(10) представляется удовлетворительным.

Выражения (8), (10) вместе с данными, представленными в таблице, реализуют заявленную цель работы — определение зависимости времени охлаждения парогазовой смеси в заданном температурном интервале от ее начальной температуры. Задачей дальнейших исследований является применение предложенного в работе подхода с использованием характеристической температуры, определяющей зависимость времени охлаждения от начальной температуры смеси, для турбулентных потоков в двухскоростном приближении.

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание № 075-01056-22-00 от 24.12.2021 г.).

### Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] D. Zang, S. Tarafdar, Yu.Yu. Tarasevich, M. Dutta Choudhury, T. Dutta, Phys. Rep., **804**, 1 (2019). DOI: 10.1016/j.physrep.2019.01.008
- [2] S.P. Fisenko, W.-N. Wang, I.W. Lenggoro, K. Okuyama, Chem. Eng. Sci., **61** (18), 6029 (2006). DOI: 10.1016/j.ces.2006.05.028
- [3] A.B.D. Nandiyanto, K. Okuyama, Adv. Powder Technol., **22** (1), 1 (2011). DOI: 10.1016/j.appt.2010.09.011
- [4] И.В. Деревич, А.Ю. Фокина, Инж. журн.: наука и инновации, вып. 8 (2013). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-8-886
- [5] W.C. Park, A. Atreya, H.R. Baum, Combust. Flame, **157** (3), 481 (2010). DOI: 10.1016/j.combustflame.2009.10.006
- [6] A.L. Shevchenko, G.A. Sytchev, V.M. Zaichenko, J. Phys.: Conf. Ser., **2096**, 012082 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012082
- [7] V.I. Terekhov, P.N. Karpov, A.D. Nazarov, A.F. Serov, Int. J. Heat Mass Transf., **158**, 120057 (2020). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120057
- [8] A.O. Zhdanova, R.S. Volkov, I.S. Voytkov, K.Y. Osipov, G.V. Kuznetsov, Int. J. Heat Mass Transf., **126** (Pt A), 703 (2018). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.085
- [9] А.А. Бринь, С.П. Фисенко, Ю.А. Ходыко, Инж.-физ. журн., **84** (2), 274 (2011). [A.A. Brin, S.P. Fisenko, Yu.A. Khodyko, J. Eng. Phys. Thermophys., **84** (2), 292 (2011). DOI: 10.1007/s10891-011-0472-1].
- [10] Н.М. Корценштейн, Письма в ЖТФ, **48** (11), 41 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.11.52613.19199 [N.M. Kortsenshteyn, Tech. Phys. Lett., **48**, 169 (2022). DOI: 10.1134/S1063785022040204].
- [11] N.A. Fuchs, *Evaporation and droplet growth in gaseous media* (Pergamon Press, N.Y., 1959), p. 63.
- [12] L.A. Dombrovsky, A.A. Fedorets, V.Yu. Levashov, A.P. Kryukov, E. Bormashenko, M. Nosonovsky, Int. J. Heat Mass Transf., **161**, 120255 (2020). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120255

- [13] Н.М. Корценштейн, Г.Я. Герасимов, Л.В. Петров, Ю.Б. Шмельков, Теплоэнергетика, № 9, 6 (2020). DOI: 10.1134/S0040363620090040 [N.M. Kortsenshteyn, G.Ya. Gerasimov, L.V. Petrov, Yu.B. Shmel'kov, Therm. Eng., 67 (9), 591 (2020). DOI: 10.1134/S0040601520090049].
- [14] Н.Б. Варгафтик, *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей* (Наука, М., 1972).