

01.1;03.2

Охлаждение парогазовой смеси испаряющимися каплями воды

© Н.М. Корценштейн

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

Поступило в Редакцию 24 марта 2022 г.

В окончательной редакции 17 апреля 2022 г.

Принято к публикации 19 апреля 2022 г.

Представлена модель термической релаксации в потоке горячей парогазовой смеси и холодных капель воды. Проведено численное моделирование охлаждения пара и газа при нагреве и испарении капель. Получены аппроксимационные выражения для времени охлаждения пара и газа в заданном температурном интервале в зависимости от начального радиуса капель, массовой доли капель и начального состава парогазовой смеси.

Ключевые слова: термическая релаксация, численное моделирование, нагрев и испарение капель, время охлаждения пара и газа.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.11.52613.19199

Исследование испарения капель остается актуальным [1,2] в том числе в связи с возможными приложениями. Среди них получение наночастиц методом LPSP (low-pressure spray pyrolysis), включающим испарительное охлаждение капель [3]; моделирование процесса горения в двигателях и топках котлов на основе описания нагрева и испарения капель жидкого топлива [4]; испарительное охлаждение газочапельными потоками поверхностей различных аппаратов [5]; пожаротушение с помощью „водяного тумана“ (water mist fire suppression systems) [6]. Используемые в этих и других исследованиях подходы наряду с современными возможностями численного моделирования позволяют дать детальное описание процессов в изучаемом объекте с получением результатов, зачастую применимых только к рассмотренной ситуации. С другой стороны, имеется возможность, упростив постановку задачи, на основе результатов численного моделирования получить обобщающие зависимости для полезных оценок. В настоящей работе реализован именно такой подход.

Объектом рассмотрения был поток горячей парогазовой смеси и холодных капель воды. Предполагалось, что поток движется в канале переменного сечения, изменение которого по длине канала обеспечивает постоянство скорости и давления. Поток ламинарный и односкоростной. В отличие от работы [7], где рассматривалось охлаждение газа в облаке испаряющихся капель, было исследовано влияние состава парогазовой смеси на скорость ее охлаждения испаряющимися каплями. Цель настоящей работы — получение соотношения, связывающего время охлаждения парогазовой смеси в заданном температурном интервале с начальными значениями радиуса капель, массовой доли капель и состава парогазовой смеси. Было использовано обобщение результатов численного моделирования. На основе указанных соотношений, полученных без привязки к конкретному объекту, можно будет оценивать возможности

охлаждения потока парогазовой смеси испаряющимися каплями воды в различных приложениях, в частности для закалки (быстрого охлаждения) газообразных продуктов химической реакции во избежание образования нежелательных вторичных продуктов.

Использованная 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

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

— в процессе охлаждения газа число капель не меняется, и для монодисперсного распределения (обсуждение потенциального влияния полидисперсности дано в работе [7]) изменение массовой доли капель определяется изменением массы и радиуса одной капли

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

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

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

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

— профиль канала, обеспечивающий на участке релаксации постоянство давления и скорости течения, определяется из уравнения, следующего из комбинации уравнений движения и энергии:

$$\frac{dA}{dx} = -A \left(\frac{Q_{vg-d}}{(g_v c_{pv} + g_g c_{pg}) T_{vg}} + \frac{\mu_{vg}}{\mu_v} \frac{dg_d}{dx} \right). \quad (5)$$

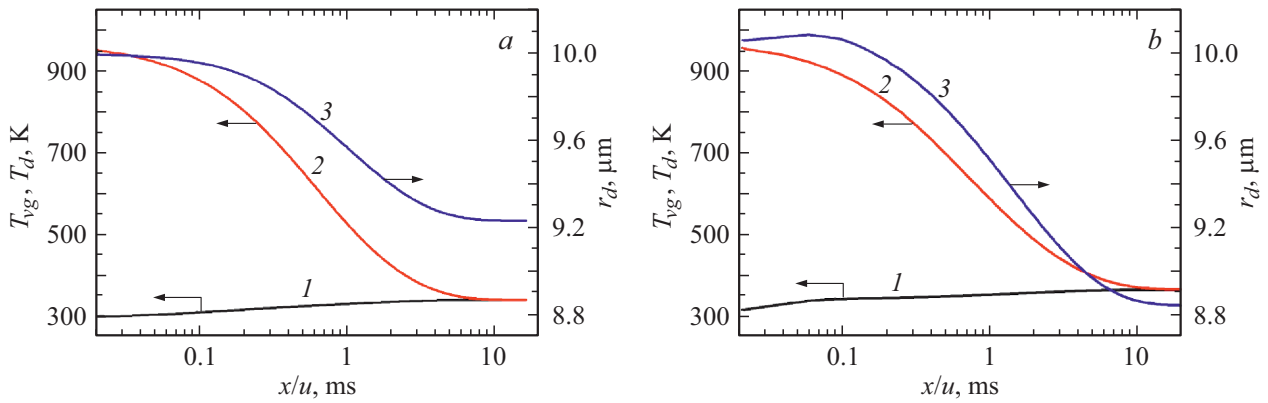


Рис. 1. Изменение параметров в зоне термической релаксации. 1 — температура капле, 2 — температура парогазовой смеси, 3 — радиус капле. a — $g_{vgf}^0 = 0$, b — $g_{vgf}^0 = 0.5$; $g_d^0 = 0.5$.

Здесь x и u — координата и скорость вдоль оси потока, A — площадь поперечного сечения канала, 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 на единице длины потока,

$$Q_{vg-d} = \left(\frac{3g_d}{\rho_1 u r_d^2} \right) \frac{\text{Nu}}{2} \lambda_{vg} (T_{vg} - T_d), \quad (6)$$

где λ_{vg} — коэффициент теплопроводности парогазовой смеси, Nu — число Нуссельта, при использованном одностороннем приближении (капли заморожены в поток) $\text{Nu} = 2$.

Выражение для скорости испарения капле (с начальным радиусом $\sim 10 \mu\text{m}$) в диффузионном режиме с учетом стефановского течения выбрано в виде [8] (см. также [9]):

$$\frac{dr_d}{dx} = - \frac{\rho_{vg} D}{\rho_l u r_d} \left(\ln \frac{(1 - \alpha_1)}{(1 - \alpha_2)} \right), \quad (7)$$

где

$$\alpha_1 = \frac{\rho_\Sigma g_v}{\rho_{vg}}, \quad \alpha_2 = \frac{\rho_v^s}{\rho_{vg}}, \quad \rho_{vg} = \rho_\Sigma \left(g_v + g_g \frac{\mu_v}{\mu_g} \right), \quad (8)$$

ρ_i и μ_i — плотность и молярная масса i -го компонента смеси, ρ_v^s — плотность пара в состоянии насыщения, индексы v , g , d , l , Σ относятся соответственно к пару, газу, каплям, веществу капли и смеси в целом.

Были приняты следующие допущения в модели термической релаксации и соответствующие им временные ограничения.

1. Быстрое выравнивание температур пара и газа в межмолекулярных столкновениях ($\tau_{vg} \sim 0.01 \mu\text{s}$) позволяет использовать для газовой фазы одно уравнение энергии (при $t > \tau_{vg}$).

2. Температурный профиль внутри испаряющихся капле однородный (при $t > \tau_{0.05}^c$). Согласно оценкам

по формулам нестационарной теплопроводности [10], в капле воды радиусом $10 \mu\text{m}$ относительная разность температур меньше 5% достигается за время $\tau_{0.05}^c = 5.5 \mu\text{s}$.

3. Процесс испарения капле квазистационарный (при $t > \tau_{0.05}^D$). Согласно оценкам на основе [8], для капле воды радиусом $10 \mu\text{m}$ значение $\tau_{0.05}^D$, обеспечивающее (при $t > \tau_{0.05}^D$) вклад нестационарности в скорость испарения менее 5%, составляет $500 \mu\text{s}$.

Численное моделирование процесса охлаждения на основе системы уравнений (1)–(7) проведено методом Кутты–Мерсона с автоматическим выбором шага с использованием авторской программы COND-KINET-1 [11] для парогазовой смеси водяной пар–азот с начальным массовым содержанием пара от 0 до 100%. Начальная температура парогазовой смеси составляет 973 К, капле воды — 293 К. Скорость потока 10 м/с. Необходимые справочные материалы по свойствам азота, водяного пара и воды взяты из [12]. Варьируемыми величинами были начальные значения радиуса капле r_d^0 , массовой доли капле 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 радиуса и температуры капле. Для одного из вариантов расчета они представлены на рис. 1. Видно, что характерные времена процессов нагрева и испарения капле в сравнении с величинами $\tau_{0.05}^c$ и $\tau_{0.05}^D$ таковы, что подтверждается справедливость использованных допущений об однородном температурном профиле в каплях и квазистационарном испарении. Отметим, что в случае $g_{vgf}^0 \neq 0$ (рис. 1, b) этапу испарения капле предшествует кратковременный этап конденсации пара на каплях с более интенсивным нагревом капле, чем в случае $g_{vgf}^0 = 0$ (рис. 1, a), поскольку горячий водяной пар изначально пересыщен относительно холодных капле. Работоспособность принятой модели термической релаксации подтверждается совпадением вычисленных стационарных значений (плотности пара, температур парогазовой смеси и капле) и соответ-

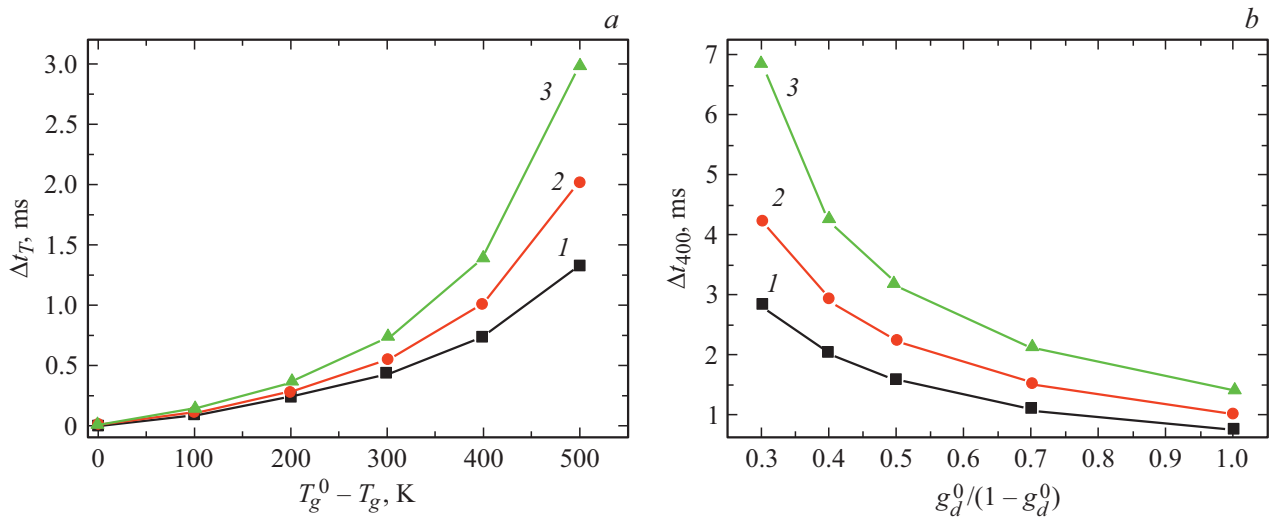


Рис. 2. Время охлаждения парогазовой смеси в зависимости от величины температурного интервала (а) и массового отношения капли/парогазовая смесь при $\Delta T = 400$ К (b) для различных начальных составов парогазовой смеси. $g_{vgf}^0 = 0$ (1), 0.5 (2), 1 (3).

Коэффициенты полиномиальных разложений в выражении (10)

g_{vgf}^0	A_1 , ms	$-A_2$, ms	A_3 , ms	B_1	$-B_2$	B_3
0	1.47767	2.427	8.88333	0.28033	0.531	1.21667
0.3	1.79755	3.8865	12.92	0.32267	0.697	1.87333
0.5	2.07817	5.0355	16.0683	0.36552	0.932	2.58833
0.7	2.34845	6.051	19.135	0.53287	1.7755	4.29833
1	2.60592	6.6375	22.34333	1.14815	5.095	10.555

ствующих равновесных значений, следующих из законов сохранения массы и энергии для смеси пар–газ–капли.

На основании результатов расчетов получены времена охлаждения парогазовой смеси в заданном температурном интервале при изменении варьируемых параметров (рис. 2). Для выбранного значения g_{vgf}^0 время охлаждения парогазовой смеси (в миллисекундах) от начального значения T_{vg}^0 до заданного значения T_{vg} в зависимости от начального радиуса капель r_d^0 (в микрометрах, отнесено к базовому значению $10 \mu\text{m}$) и массовой доли капель g_d^0 описывается выражением, которое аналогично предложенному в работе [7]:

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

В рассмотренном интервале значений g_{vgf}^0 (0; 0.3; 0.5; 0.7; 1) для величин A (ms) и n определены коэффициенты разложения полиномами третьей степени по параметру $Y = (T_{vg}^0 - T_{vg})/1000$:

$$A = \sum_{i=1}^{i=3} A_i Y^i, \quad n = 1 + \sum_{i=1}^{i=3} B_i Y^i \quad (10)$$

Коэффициенты разложения представлены в таблице. Видно, что по модулю они возрастают с увеличени-

ем g_{vgf}^0 , что отражает тенденцию увеличения времени охлаждения парогазовой смеси при возрастании в ней начальной концентрации паров воды (рис. 2). По-видимому, это связано с большим значением теплоемкости паров воды по сравнению с теплоемкостью азота.

Выражения (9), (10) в сочетании с данными, представленными в таблице, реализуют заявленную цель работы. Можно предположить, что учет таких не учтенных в работе факторов, как обдув капель газом (двухскоростная модель) и турбулентность потока, привел бы к снижению времени охлаждения за счет интенсификации межфазного теплообмена и процесса испарения капель. Следовательно, полученные результаты дают оценку сверху для времени охлаждения газа испаряющимися каплями.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (ГЗ № 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] А.Е. Кучма, Н.Е. Есипова, А.А. Михеев, А.К. Щекин, С.В. Ицков, Коллоид. журн., **81** (6), 724 (2019). DOI: 10.1134/S0023291219060089 [А.Е. Kuchma, N.E. Esipova, A.A. Mikheev, A.K. Shchekin, S.V. Itskov, Colloid J., **81** (6), 687 (2019). DOI: 10.1134/S1061933X19060085].
- [3] С.П. Фисенко, Ю.А. Ходыко, Инж.-физ. журн., **93** (6), 1368 (2020). [S.P. Fisenko, Y.A. Khodyko, J. Eng. Phys. Thermophys., **93** (6), 1317 (2020). DOI: 10.1007/S10891-020-02266-6].
- [4] S.S. Sazhin, Fuel, **196**, 69 (2017). DOI: 10.1016/j.fuel.2017.01.048
- [5] V.I. Terekhov, P.N. Karpov, A.D. Nazarov, A.F. Serov, Int. J. Heat Mass Transfer, **158**, 120057 (2020). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120057
- [6] A.O. Zhdanova, R.S. Volkov, I.S. Voytkov, K.Yu. Osipov, G.V. Kuznetsov, Int. J. Heat Mass Transfer, **126** (Pt A), 703 (2018). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.085
- [7] Н.М. Корценштейн, Коллоид. журн., **83** (5), 548 (2021). DOI: 10.31857/S0023291221050062 [N.M. Kortsenshteyn, Colloid J., **83** (5), 582 (2021). DOI: 10.1134/S1061933X21050069].
- [8] N.A. Fuchs, *Evaporation and droplet growth in gaseous media* (Pergamon Press, N.Y., 1959), p. 63.
- [9] В.Ю. Левашов, А.П. Крюков, Коллоид. журн., **79** (5), 606 (2017). DOI: 10.7868/S002329121705010X [V.Yu. Levashov, A.P. Kryukov, Colloid J., **79** (5), 647 (2017). DOI: 10.1134/S1061933X1705009X].
- [10] А.В. Лыков, *Теория теплопроводности* (Высш. шк., М., 1967), с. 105–107.
- [11] 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].
- [12] Н.Б. Варгафтик, *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей* (Наука, М., 1972).