

## Температурный режим в газокапельной смеси при наличии внутреннего источника тепла

© Н.М. Корценштейн

Объединенный институт высоких температур РАН,  
125412 Москва, Россия  
e-mail: naumkor@yandex.ru

Поступило в Редакцию 22 июля 2024 г.  
В окончательной редакции 30 сентября 2024 г.  
Принято к публикации 11 октября 2024 г.

Представлены результаты численного моделирования температурного режима смеси газа и испаряющихся капель воды в замкнутом теплоизолированном объеме при наличии внутреннего источника тепла. Внутренний источник тепла представлен мономолекулярной экзотермической реакцией с температурной зависимостью константы скорости согласно закону Аррениуса. Исследовано влияние изменения начальных значений температур газа и капель, массовой доли и радиуса капель на температурный режим. Проанализированы возможность стабилизации температуры реагирующего газа испаряющимися каплями и ограничения режима термостатирования.

**Ключевые слова:** капли, испарительное охлаждение, экзотермическая реакция, закон Аррениуса, численное моделирование.

DOI: 10.61011/JTF.2025.01.59456.238-24

### Введение

Процесс испарения капель продолжает привлекать внимание, как в научном плане, так и в связи с различными приложениями [1]. В частности, испарительное охлаждение капель раствора при получении наночастиц [2,3], охлаждение испаряющимися каплями различных поверхностей [4–6] или окружающего газа [7–9]. Для этого случая в работах [10,11] получены соотношения, связывающие время снижения температуры газа на заданную величину с начальными значениями температуры газа, массовой концентрации и радиуса капель. Еще одним применением процесса испарения капель может быть управление температурным режимом экзотермической реакции путем впрыска высокодисперсных капель воды в реакционный объем. В том числе при термической переработке древесной биомассы [12]. Появление капель в реакционном объеме может проявиться по трем направлениям: 1) влияние поверхности капель на ход реакции; 2) влияние испаряющегося вещества (пара) на ход реакции; 3) влияние процесса испарения на температуру газокапельной смеси и, как следствие, на ход реакции. В настоящей работе внимание уделено третьему направлению. Его значимость тем выше, чем больше отношение теплоты испарения к тепловому эффекту реакции. В рамках указанного направления рассмотрен температурный режим в газокапельной смеси при одновременном протекании двух процессов — экзотермической реакции и эндотермического испарения капель; проанализировано влияние соотношения характерных времен этих процессов и факторов, влияющих на это соотношение; рассмотрена принципиальная возможность стабилизации температуры реагирующего газа

испаряющимися каплями, а также ограничения режима термостатирования.

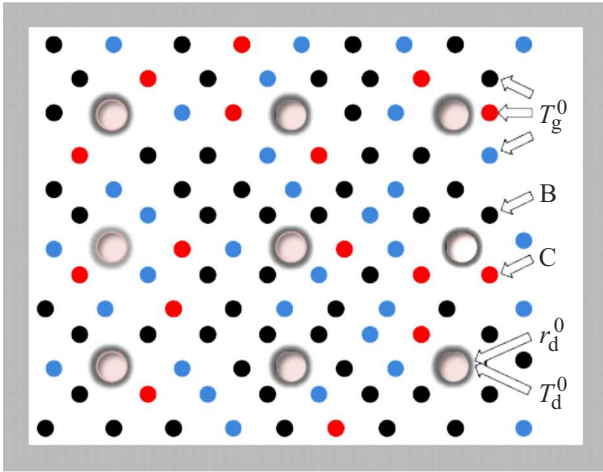
### 1. Постановка задачи и математическая модель

Рассматриваются находящиеся в замкнутом теплоизолированном объеме газ с внутренним источником тепла и капли. Капли неподвижны, равномерно распределены в объеме и имеют одинаковый размер. Заданными величинами являются начальные значения температуры газа и капель, массовая доля и радиус капель. Предполагается, что внутренним источником тепла является экзотермическая мономолекулярная реакция в газовой фазе вида  $B \rightarrow C$  с температурной зависимостью константы скорости реакции, согласно закону Аррениуса, а капли и образующиеся пары не влияют на ход реакции. Тепловыделение в ходе реакции приводит к росту температуры газовой фазы, а межфазный теплообмен и последующее испарение капель приводит к ее снижению. Искомой величиной является временной ход температуры газовой фазы при одновременном протекании реакции и испарении капель. Постановку задачи иллюстрирует рис. 1.

Решение поставленной задачи основано на численном моделировании. Использованная математическая модель аналогична модели, представленной в [10], с дополнениями, учитывающими кинетику химической реакции:

$$\frac{dg_B}{dt} = -k(T)g_B, \quad (1)$$

где  $g_B$  — массовая доля компонента  $B$ ,  $k(T)$  — константа скорости реакции с температурной зависимостью



**Рис. 1.** Схема постановки задачи: замкнутый теплоизолированный объем, содержащий смесь газа, каплей и пара. Крупные кружки — испаряющиеся капли. Мелкие кружки — молекулы газовой фазы сорта В (черного цвета) и С (красного цвета), а также молекулы пара (голубого цвета).

согласно закону Аррениуса:

$$k(T) = A \exp(-E/RT). \quad (2)$$

Здесь  $A$ ,  $[s^{-1}]$  — предэкспоненциальный множитель;  $E$ ,  $[J/mol]$  — энергия активации,  $R$ ,  $[J/(mol \cdot K)]$  — универсальная газовая постоянная,  $T$  — абсолютная температура.

Уравнения материального баланса в процессах химического преобразования и испарения каплей связывают изменения массовых долей компонентов смеси, состоящей из молекул сорта В и С, пара ( $v$ ) и каплей ( $d$ ):

$$\frac{dg_C}{dt} = -\frac{dg_B}{dt}, \quad \frac{dg_v}{dt} = -\frac{dg_d}{dt}. \quad (3)$$

Для каплей одинакового размера (монодисперсное распределение каплей по размерам) уравнение материального баланса имеет вид

$$\frac{dg_d}{dt} = \frac{3g_d}{r_d} \frac{dr_d}{dt}, \quad (4)$$

где  $g_i$  — массовая доля соответствующего компонента,  $r_d$  — радиус капли.

Как следует из уравнения (4), изменение массовой доли всех каплей определяется скоростью испарения одной капли. Это утверждение верно для независимо испаряющихся каплей, когда среднее расстояние между каплями ( $n_d^{-1/3}$ ) значительно больше диаметра капли, что ограничивает диапазон значений  $g_d$ , для которых применимо уравнение (4). Для каплей одинакового размера их массовая доля определяется выражением

$$g_d = \frac{4}{3} \pi \rho_1 n_d r_d^3 / \rho_\Sigma. \quad (5)$$

Здесь  $n_d$  — числовая плотность каплей,  $[m^{-3}]$ , плотность вещества капли,  $[kg/m^3]$ ,  $\rho_\Sigma$  — суммарная плотность смеси пара, газа и каплей,  $[kg/m^3]$ , являющаяся постоянной величиной в рассматриваемом случае замкнутого объема.

С учетом (5) ограничения на применимость уравнения (4) имеют вид

$$g_d^0 \leq \frac{\pi \rho_1}{6 \rho_\Sigma} N^{-3}, \quad (6)$$

$$n_d^0 \leq (2r_d^0 N)^{-3}, \quad (7)$$

где  $N$  — отношение среднего расстояния между каплями к диаметру капли.

Видно, что ограничение на массовую плотность не зависит от размера каплей. Напротив, ограничения на числовую плотность каплей определяются именно их размером. В частности, при  $N = 10$  для каплей диаметром  $100 \mu m$  получаем  $n_d \leq 10^0 m^{-3}$ . Скорость испарения каплей с учетом течения Стефана вычислялась согласно выражению [13] (см. также [14]):

$$\frac{dr_d}{dt} = -\frac{\rho_{vg} D}{\rho_1 r_d} \left( \ln \frac{(1 - \alpha_1)}{(1 - \alpha_2)} \right). \quad (8)$$

Здесь

$$\alpha_1 = \frac{\rho_v}{\rho_{vg}}, \quad \alpha_2 = \frac{\rho_v^s}{\rho_{vg}}, \quad \rho_{vg} = \rho_v + \rho_g \frac{\mu_v}{\mu_g}, \quad (9)$$

где  $\mu_i$  и  $\rho_i$  — соответственно молярная масса,  $[kg/mol]$ , и плотность  $i$ -го компонента смеси,  $\rho_v^s$  — плотность насыщенного пара,  $[kg/m^3]$ ,  $D_v$  — коэффициент диффузии молекул пара,  $[m^2/s]$ .

Уравнения энергии для компонентов смеси имеют вид

$$c_g \frac{dT_g}{dt} = Q_{ex} \frac{dg_C}{dt} - Q_{gd}, \quad (10)$$

$$g_d c_d \frac{dT_d}{dt} = \frac{dg_d}{dt} (\Delta u_{vd}(T_d) + c_v(T_g - T_d)) + Q_{gd}. \quad (11)$$

Здесь  $T_g$  — единая для компонентов газовой фазы температура газа,

$$c_g = g_A c_A + g_B c_B + g_v c_v \quad (12)$$

— теплоемкость газовой фазы в целом,  $[J/(kg \cdot K)]$ ,  $c_i$  — изохорная теплоемкость  $i$ -го компонента,  $Q_{gd}$ ,  $[W/kg]$  — количество тепла, передаваемое в единицу времени в единицу массы смеси от газа к каплям,  $Q_{ex}$ ,  $[J/kg]$  — тепловой эффект химической реакции,  $\Delta u_{vd}$  — изменение внутренней энергии в процессе испарения  $[J/kg]$ .

Для определения  $\Delta u_{vd}$  использована связь с теплотой испарения  $L$ ,  $[J/kg]$ , давлением  $p_v^s$ ,  $[Pa]$  и плотностью  $\rho_v^s$  пара в состоянии насыщения,  $[kg/m^3]$ :

$$\Delta u_{vd}(T) = L(T) - p_v^s(T) / \rho_v^s(T). \quad (13)$$

Для определения величины  $Q_{gd}$  использовано выражение

$$Q_{gd} = \left( \frac{3g_d}{\rho_1 r_d^2} \right) \frac{Nu}{2} \lambda_g (T_g - T_d), \quad (14)$$

где  $\lambda_g$  — коэффициент теплопроводности газа [W/(m·K)], Nu — число Нуссельта, при отсутствии обдува капель газом Nu = 2.

Принятые допущения в модели:

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 капель однородный.

Для оценки корректности данного допущения найдем отношение времен выравнивания температуры в капле с относительной точностью менее 5% ( $\tau_{0.05}^c$ ) и времени испарения капли ( $\Delta t_{\text{vap}}$ ). На основе данных, представленных в [15], искомой величине  $\tau_{0.05}^c$  соответствует критерий Фурье Fo = 0.4. Следовательно

$$\tau_{0.05}^c = 0.4(r_d^0)^2/a_1, \quad (15)$$

где  $a_1$  — температуропроводность воды, [m<sup>2</sup>/s]. Для оценки времени испарения капли используем выражение [13]:

$$\Delta t_{\text{vap}} = \frac{\rho_1(r_d^0)^2}{2\rho_v^s D_v}. \quad (16)$$

В итоге получаем

$$\frac{\tau_{0.05}^c}{\Delta t_{\text{vap}}} = 0.8 \frac{D_v \rho_v^s}{a_1 \rho_1}. \quad (17)$$

Видно, что искомое отношение не зависит от радиуса капли, а определяется линией насыщения и свойствами переноса пара и вещества капли. Для воды в интервале от тройной точки до точки нормального кипения это отношение принимает значения 0.000635–0.0836. При характерных значениях температуры испаряющейся капли в нагретом газе 323–343 К [10,11] оно составляет 0.0124–0.0298. Следовательно, время выравнивания температуры внутри капли много меньше времени испарения капли, предположение об однородном профиле температуры в испаряющихся каплях является корректным.

3) Испарение капель происходит в квазистационарном режиме. Для оценки корректности данного допущения применим аналогичный подход. Определим значение величины  $\tau_{0.05}^D$ , обеспечивающее (на временах, превышающих  $\tau_{0.05}^D$ ) вклад нестационарности менее 5% [13]:

$$\tau_{0.05}^D = 400r_d^2/\pi D_v. \quad (18)$$

Сравнение величин  $\tau_{0.05}^D$  и  $\Delta t_{\text{vap}}$  дает

$$\frac{\tau_{0.05}^D}{\Delta t_{\text{vap}}} = \frac{800\rho_v^s}{\pi\rho_1}. \quad (19)$$

Для воды в интервале от тройной точки до точки нормального кипения это отношение принимает значения 0.0012–0.1523. При характерных значениях температуры испаряющейся капли в нагретом газе 323–343 К [10,11]

оно составляет 0.0212–0.0517. Следовательно, предположение о квазистационарном режиме испарения также является корректным.

4) Испарение каждой капли происходит независимо. Данное предположение и ограничения, связанные с ним, рассмотрены выше.

5) Монодисперсное распределение капель по размерам.

В работе [16] проведено сопоставление результатов моделирования испарения совокупности капель в полидисперсном и монодисперсном приближениях, а также с экспериментальными данными [17]. Сделан вывод, что расхождение трех групп результатов  $\sim 10\%$ . Отметим, что аналогичный вывод сделан в работе [18] при сравнении результатов моделирования гетерогенной конденсации пара на моно- и полидисперсных центрах.

Для валидации модели были использованы данные по охлаждению газа испаряющимися каплями, представленные в работе [19]. Как указано в [19], время, необходимое для охлаждения газа при  $\Delta T = 20$  К в газокapельном потоке с начальной температурой 296 К и массовым содержанием в 3% капель микронного размера (более точно в [19] не указано), составляет 10  $\mu\text{s}$ . Это же значение, определенное на основе численного решения системы уравнений представленной модели для  $r_d^0 = 1\text{--}2 \mu\text{m}$ , дало диапазон 3.5–14  $\mu\text{s}$ . Учитывая неопределенность в величине  $r_d^0$ , результат использования модели представляется удовлетворительным.

## 2. Результаты и обсуждение

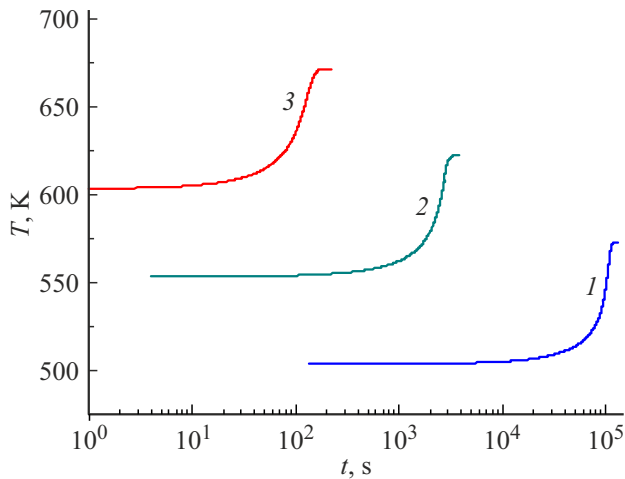
Представленная выше модель была применена для анализа двух случаев: 1) температурный режим в реагирующем газе при отсутствии капель; 2) температурный режим в реагирующем газе при наличии испаряющихся капель. Для численного решения использовалась авторская программа CONDKINET-1 [20]. Теплофизические свойства реагентов В и С моделировались свойствами азота. Необходимые свойства компонентов (вода, водяной пар, азот) брались согласно [21].

### 2.1. Температурный режим в реагирующем газе при отсутствии капель

Для параметров экзотермической реакции были выбраны характерные значения  $Q_{\text{ex}} = 74000$  J/kg,  $E = 180$  kJ/mol,  $A = 10^{13\text{s}^{-1}}$  [12]. Варьируемой величиной была начальная температура газа  $T_g^0$ . Результаты расчета представлены на рис. 2.

Видно, что в зависимости от значения начальной температуры время протекания реакции меняется очень сильно. В то же время повышение температуры в результате реакции не зависит от начальной температуры и определяется балансовым соотношением

$$T_g^{\text{end}} - T_g^0 = Q_{\text{ex}}/c_g, \quad (20)$$



**Рис. 2.** Зависимость температуры газа от времени при различных значениях  $T_g^0$ : 1 — 503.15 К,  $E/(RT_g^0) = 43.03$ ; 2 — 553.15 К,  $E/(RT_g^0) = 39.14$ ; 3 — 603.15 К,  $E/(RT_g^0) = 35.90$ .

где  $T_g^{\text{end}}$  — конечная температура газа.

При отсутствии капель уравнения (1) и (10) можно привести к одному виду с одинаковыми нулевыми начальными условиями

$$\frac{d\xi}{dt} = k(T_g)(1 - \xi), \quad (21)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = k(T_g)(1 - \xi). \quad (22)$$

Здесь  $\xi$  — степень превращения, определяемая как

$$\xi = 1 - \frac{g_B}{g_B^0} \quad 0 \leq \xi \leq 1, \quad (23)$$

$g_B^0$  — массовая доля компонента В в начальный момент времени,  $\theta$  — безразмерная температура:

$$\theta = \frac{T_g - T_g^0}{T_g^{\text{end}} - T_g^0} = \frac{c_g(T_g - T_g^0)}{Q_{\text{ex}}} \quad 0 \leq \theta \leq 1. \quad (24)$$

На начальной стадии реакции при небольшой степени превращения ( $\xi \ll 1$ ) решение уравнения (22) имеет вид

$$\theta = k(T_g^0)t. \quad (25)$$

Полученное решение позволяет определить время разогрева реагирующего газа до определенного уровня на начальной стадии реакции в зависимости от начальной температуры газа:

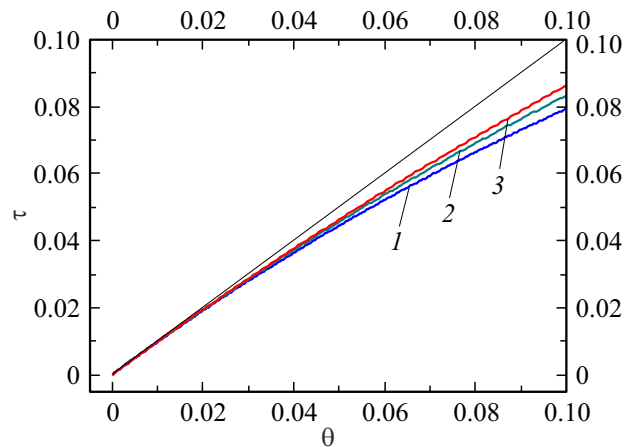
$$t = \frac{\theta}{k(T_g^0)} \quad (26)$$

или

$$\tau = \theta. \quad (27)$$

Здесь  $\tau$  — безразмерное время

$$\tau = tk(T_g^0). \quad (28)$$



**Рис. 3.** Зависимость времени разогрева газа до конечной температуры в безразмерных координатах при различных значениях  $T_g^0$ . Обозначения кривых согласно рис. 2. Прямая линия соответствует зависимости  $\tau = \theta$ .

Сравнение времени разогрева, полученного из численного решения уравнения (22), и приближенного аналитического решения (27), представлено на рис. 3. Видно, что приближенное аналитическое решение (27) дает оценку сверху для времени разогрева. При  $\theta \leq 0.05$  погрешность определения времени разогрева с использованием выражения (27) не превышает 10%.

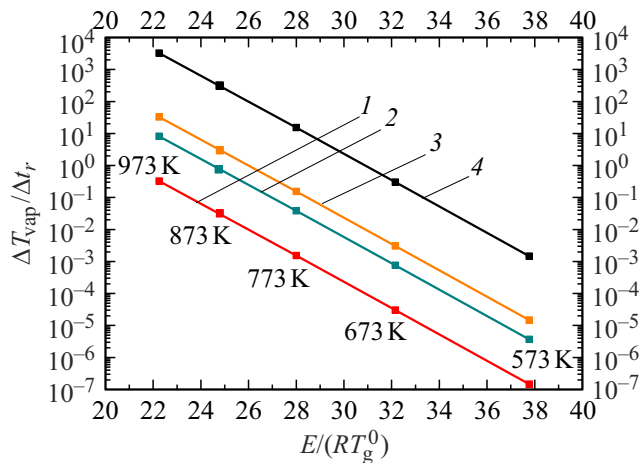
## 2.2. Температурный режим в реагирующем газе при наличии испаряющихся капель

В рассматриваемом случае имеет место конкуренция двух процессов: экзотермической реакции в газовой фазе и эндотермического испарения капель. Можно предположить, что в зависимости от соотношения характерных времен процесса испарения  $\Delta t_{\text{vap}}$  и протекания реакции  $\Delta t_r$  реализуется один из трех сценариев: при условии  $\Delta t_{\text{vap}} \gg \Delta t_r$  реакция успевает закончиться и нагреть газ до начала испарения, а затем испаряющиеся капли его охлаждают; при  $\Delta t_{\text{vap}} \ll \Delta t_r$  капли успевают испариться и охладить практически не реагирующий газ, в котором затем начнется реакция; при  $\Delta t_{\text{vap}} \sim \Delta t_r$  имеет место одновременное протекание обоих процессов и их взаимное влияние.

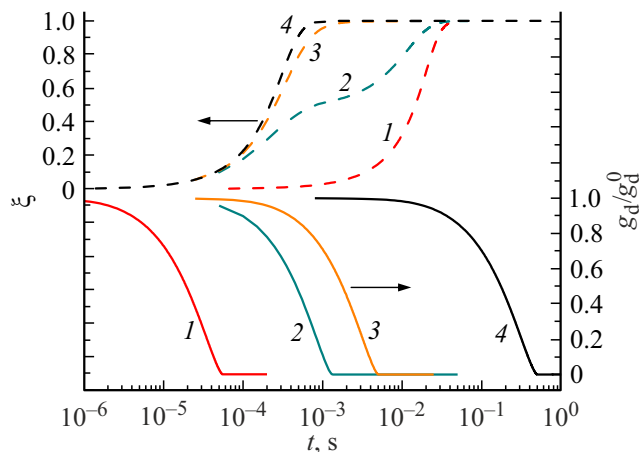
Температурная зависимость величины  $\Delta t_{\text{vap}}/\Delta t_r$  представлена на рис. 4. Характерное время мономолекулярной реакции определялось как

$$\Delta t_r = k(T_g^0)^{-1}, \quad (29)$$

а время процесса испарения было найдено из численного решения системы уравнений представленной выше модели без учета теплового эффекта реакции. Как видно из рис. 4, при достаточно высоких температурах, соответствующих условию  $(E/(RT_g^0))$ , возможна реализация всех трех сценариев при варьировании начального радиуса капель. Напротив, при достаточно низких температурах



**Рис. 4.** Соотношение характерных времен испарения и реакции в зависимости от начальных значений температуры газа и радиуса капель: 1 — 1, 2 — 5, 3 — 10, 4 — 100 μm. Начальная температура капель  $T_d^0 = 293.15$  K.



**Рис. 5.** Зависимость степени завершенности реакции (штриховые кривые) и процесса испарения капель (сплошные кривые) от времени при различных начальных значениях радиуса капель: 1 — 1, 2 — 5, 3 — 10, 4 — 100 μm.  $T_d^0 = 293.15$  K,  $g_d^0 = 5\%$ .

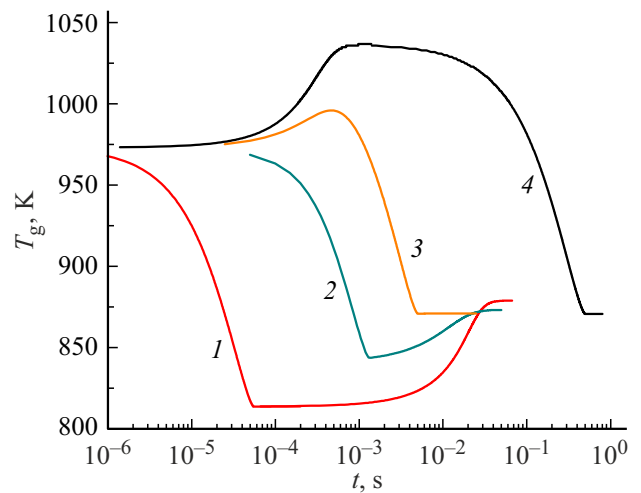
рах, когда  $(E/(RT_g^0) > 32)$ , реализуется только сценарий опережающего испарения капель. Отмеченное поведение величины  $\Delta t_{vap}/\Delta t_r$  связано с двумя обстоятельствами: квадратичной зависимостью времени испарения капель от их радиуса (см. [13]) и экспоненциальной зависимостью константы скорости реакции (и характерного времени реакции) от температуры (см. выражения (2) и (29)). При высоких температурах ( $E/(RT_g^0) < 24$ ) решающим является первое обстоятельство, при низких температурах ( $E/(RT_g^0) > 32$ ) — второе.

Представленные на рис. 5–8 данные численного интегрирования системы уравнений модели подтверждают представленные выше качественные соображения. Как следует из рис. 5–6, вариация начального радиуса

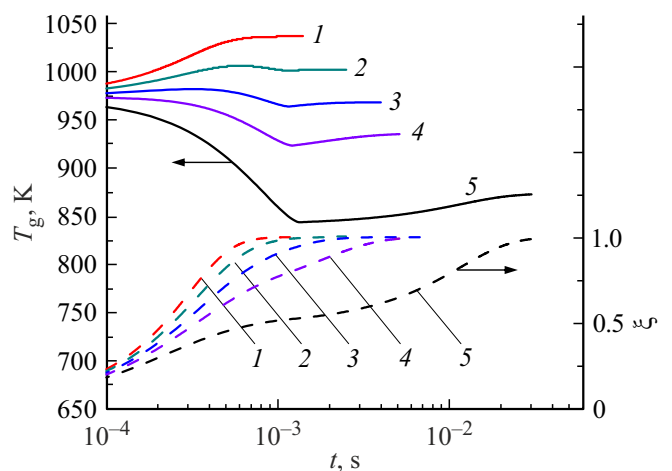
капель (соответственно, времени их испарения) при постоянной начальной температуре газа позволила проследить переход от одного сценария к другому.

Видно, что кривые 1 на рис. 5, 6 соответствуют опережающему испарению капель, а кривые 4 — опережающему протеканию реакции. Кривые 2 и 3 соответствуют одновременному протеканию процессов. При этом для преобладания процесса испарения капель оказалось достаточно соотношения  $\Delta t_{vap} = \Delta t_r/3$ . Обратим внимание (рис. 6), что для всех вариантов с одинаковым значением начальной концентрации капель конечная температура газа после испарения капель одинакова, как и должно быть согласно условию теплового баланса.

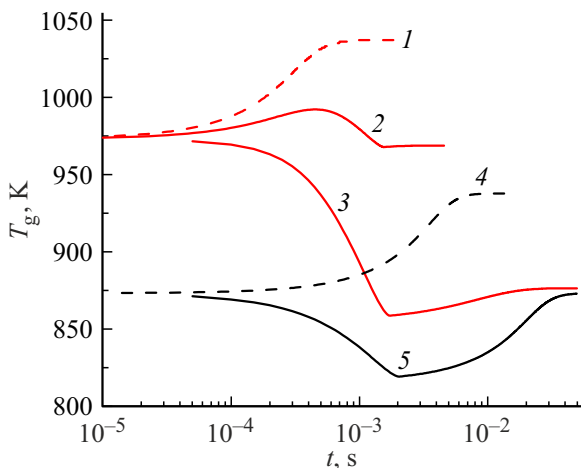
Данные, представленные на рис. 7, 8, демонстрируют влияние начальных значений массовой доли капель и



**Рис. 6.** Зависимость температуры газа от времени при различных начальных значениях радиуса капель: 1 — 1, 2 — 5, 3 — 10, 4 — 100 μm.  $T_d^0 = 293.15$  K,  $T_g^0 = 973.15$  K,  $g_d^0 = 5\%$ .



**Рис. 7.** Зависимость температуры газа и степени завершенности реакции в процессе испарения капель от времени и начальной массовой доли капель: 1 — 0, 2 — 1, 3 — 2, 4 — 3, 5 — 5%.  $T_g^0 = 973.15$  K,  $r_d^0 = 5$  μm.



**Рис. 8.** Зависимость температуры газа от времени при различных значениях массовой доли капель и начальной температуры газа: 1, 4 — отсутствие капель; 2, 5 — 2%; 3 — 5%. 1–3 — 973.15 К; 4, 5 — 873.15 К.

температуры газа на временной ход температуры газа и степени завершенности реакции. Видно (рис. 7), что увеличение начальной концентрации капель увеличивает время протекания реакции вследствие более интенсивного охлаждения газа испаряющимися каплями и протекания реакции при более низкой температуре. Как следует из данных на рис. 8, при понижении начальной температуры газа качественное подобие временных зависимостей температуры газа достигается при меньших значениях начальной концентрации капель. В частности, при  $T_g^0 = 973.15$  К режим охлаждения газа испаряющимися каплями с последующим протеканием реакции достигается, если начальная массовая доля капель составляет 5% (рис. 8, кривая 3). При  $T_g^0 = 873.15$  К такой же режим реализуется, если начальная массовая доля капель составляет 2% (рис. 8, кривая 5).

### 2.3. О стабилизации температуры реагирующего газа испаряющимися каплями

Как отмечено выше, при достаточно низких температурах, когда  $(E/(RT_g^0)) > 32$ , реализуется только сценарий опережающего испарения капель. Следовательно, в этом случае процесс испарения капель может быть использован для поддержания температуры реагирующего газа в заданных пределах, поскольку время охлаждения газа испаряющимися каплями существенно меньше времени разогрева газа вследствие протекания реакции. Рассмотрим принципиальную возможность циклического процесса по схеме: разогрев газа без капель — впрыск капель с последующим охлаждением газа испаряющимися каплями. Назовем это режимом термостатирования. Пусть допустимое значение температуры газа есть  $T_{g \max}$ . При этом  $T_{g \max} - T_g^0 \ll T_g^0$ .

В этом случае, согласно (24), соответствующее значение  $\theta_{\max} \ll 1$ . Время разогрева газа без капель до заданного предельного значения составляет согласно (26):

$$\Delta t_{\max} = \theta_{\max} / k(T_g^0). \quad (30)$$

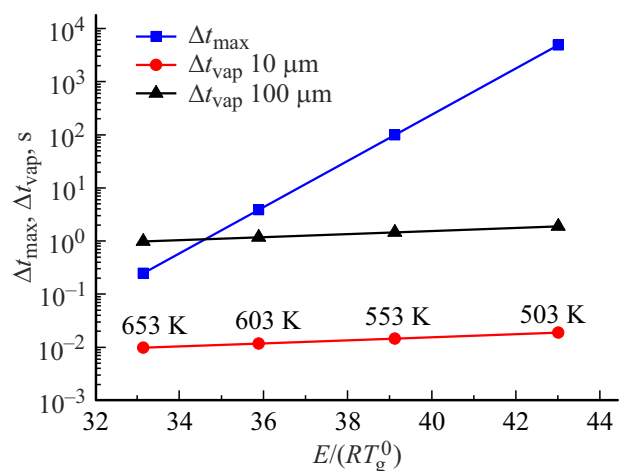
Одновременно  $\Delta t_{\max}$  определяет время существования газа в заданном температурном интервале  $\theta_{\max}$ . Следует обратить внимание, что это время тем меньше, чем выше подлежащая стабилизации температура газа.

Массовая концентрация капель для испарительного охлаждения газа до первоначальной температуры определяется из балансового соотношения

$$g_{d \max} = \frac{c_g(T_{g \max} - T_g^0)}{\Delta u_{vd}} = \theta_{\max} \frac{Q_{ex}}{\Delta u_{vd}}, \quad (31)$$

где  $\Delta u_{vd}$  — изменение внутренней энергии в процессе испарения, [J/kg] (см. выражение (13)). Принимая для оценок  $\theta_{\max} = 0.01$ , при выбранном значении  $Q_{ex}$  получаем  $g_{d \max} \approx 3 \cdot 10^{-4}$ . Испарение определенного, согласно (31), количества капель обеспечит возвращение температуры газа к первоначальному значению  $T_g^0$  — цикл замкнется. Очевидно, для реализации режима термостатирования необходимо выполнение условия  $\Delta t_{vap} \ll \Delta t_{\max}$ . При выполнении этого условия требуемая частота впрыска капель составит  $(\Delta t_{\max})^{-1}$ . Результаты определения  $\Delta t_{vap}$  на основе численного моделирования и вычислений  $\Delta t_{\max}$ , согласно (26), представлены на рис. 9.

Как видно из рис. 9, обсуждаемый метод стабилизации температуры реагирующего газа в принципе возможен. Имеется область температур, где выполняется требуемое соотношение времен разогрева и испарительного охлаждения. Два обстоятельства определяют верхнюю температурную границу этой области. Во-первых, повышение начальной температуры сокращает время существования газа в заданном температурном интервале



**Рис. 9.** Времена разогрева газа и испарительного охлаждения в зависимости от начальных значений температуры газа и радиуса капель.



и, следовательно, повышает требуемую частоту впрыска капель; во-вторых, повышение начальной температуры газа сближает времена разогрева и испарения. Увеличение начального радиуса капель смещает верхнюю температурную границу в область более низких температур. Имеется также ограничение по температуре снизу, связанное с замедлением скорости реакции при понижении температуры.

## Заключение

На основе численного моделирования в работе рассмотрен тепловой механизм взаимодействия экзотермической реакции и испаряющихся капель. Выяснено, что изменение начальных значений температур газа и капель, массовой доли и радиуса капель влияют на температурный режим вследствие изменения характерных времен реакции и испарения капель. В частности:

1) в области достаточно высоких начальных температур газа, соответствующих условию  $(E/(RT_g^0) < 24)$ , вариация начального радиуса капель и их массовой доли (соответственно времени их испарения) при постоянной начальной температуре газа позволяет перейти от режима опережающего протекания реакции к режиму опережающего испарения капель с соответствующим изменением зависимости температуры от времени;

2) увеличение начальной массовой доли капель увеличивает время протекания реакции вследствие более интенсивного охлаждения газа испаряющимися каплями и протекания реакции при более низкой температуре;

3) при понижении начальной температуры газа качественное подобие временных зависимостей температуры газа достигается при меньших значениях начальной массовой доли капель;

4) в области достаточно низких начальных температур газа, когда  $(E/(RT_g^0) > 32)$ , реализуется только режим опережающего испарения капель, что делает возможным режим термостатирования — поддержание температуры реагирующего газа в заданных пределах испаряющимися каплями;

5) режим термостатирования имеет ограничения по температуре сверху и снизу.

## Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание № 075-00270-24-00).

## Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] D. Zang, S. Tarafdar, Y.Yu. Tarasevich, M.D. Choudhury, T. Dutta. Phys. Rep., **804**, 1 (2019). DOI: 10.1016/j.physrep.2019.01.008
- [2] A.B.D. Nandiyanto, K. Okuyama. Adv. Powder Technol., **22**, 1 (2011). DOI: 10.1016/j.appt.2010.09.011
- [3] О.Г. Пенязьков, В.И. Саверченко, С.П. Фисенко, Ю.А. Ходыко. ЖТФ, **84** (8), 93 (2014).
- [4] S. Khandekar, G. Sahu, K. Muralidhar, E.Ya. Gatapova, O.A. Kabov, R. Hu, X. Luo, L. Zhao. Appl. Thermal Eng., **184**, 115640 (2021). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115640
- [5] V.I. Terekhov, P.N. Karpov, A.D. Nazarov, A.F. Serov. Int. J. Heat Mass Transfer, **58**, 120057 (2020). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120057
- [6] V.I. Saverchenko, S.P. Fisenko. (Preprint, March 2021), DOI: 10.13140/rg.2.2.23363.73766
- [7] A.O. Zhdanova, R.S. Volkov, I.S. Voytkov, K.Y. Osipov, G.V. Kuznetsov. Int. J. Heat Mass Transfer, **126**, 703 (2018). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.085
- [8] А.Л. Беркович, В.Г. Полищук, А.В. Назаренко. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политех. ун-та. **2** (219), 33, (2015). DOI: 10.5862/jest.219.4
- [9] И.В. Деревич, А.Ю. Фокина. Инженерный журнал: наука и инновации, **8** (2013), URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/hidden/886.html>. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-8-886
- [10] N.M. Kortsenshtein. Colloid J., **83** (5), 582 (2021). DOI: 10.1134/S1061933X21050069
- [11] Н.М. Корценштейн. Письма в ЖТФ, **49** (6), 11 (2023). DOI: 10.21883/pjtf.2023.06.54809.19351 [N.M. Kortsenshteyn. Tech. Phys. Lett., **49** (3), 48 (2023).]
- [12] A.L. Shevchenko, G.A. Sytchev, V.M. Zaichenko. J. Phys.: Conf. Series, **2096**, 012082 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012082
- [13] N.A. Fuchs. *Evaporation and Droplet Growth in Gaseous Media*. (Pergamon Press, NY, 1959)
- [14] A.P. Kryukov, V.Yu. Levashov, S.S. Sazhin. Int. J. Heat Mass Transfer, **47**, 2541 (2004). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.01.004
- [15] А.В. Лыков. *Теория теплопроводности* (Высшая школа, М., 1967)
- [16] Д.А. Ягодников, Ю.В. Антонов, Ю.Н. Власов. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, **4**, 71 (2011).
- [17] V.I. Terekhov, V.V. Terekhov, N.E. Shishkin, K.C. Bi. J. Eng. Phys. Thermophys., **83** (5), 883 (2010). DOI: 10.1007/S10891-010-0410-7
- [18] N.M. Kortsenshteyn, A.K. Yastrebov. Colloid J., **78** (4), 472 (2016). DOI: 10.1134/S1061933X16040104.
- [19] 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.
- [20] N.M. Kortsenshteyn, G.Ya. Gerasimov, L.V. Petrov, Yu.B. Shmelkov. Thermal Eng., **67** (9), 591 (2020). DOI: 10.1134/S0040601520090049
- [21] Н.Б. Варгафтик. *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей* (Наука, М., 1972)