

УДК 536.468

## ГОРЕНИЕ КАПЕЛЬ ВОДОМЕТАНОЛЬНОГО РАСТВОРА В ФАКЕЛЕ ГАЗОВОЙ ГОРЕЛКИ

А. С. Наумкин, Б. В. Борисов

Томский политехнический университет, 634050 Томск, alexnaumserg93@mail.ru

Проведено экспериментальное исследование процесса испарения капли водометанольного раствора. Сформулирована математическая модель этого процесса. По результатам сравнительного анализа результатов физического и численного исследования определены параметры процесса испарения капли водометанольного раствора для использования в математическом моделировании процесса его сжигания. Представлены результаты численных исследований процесса горения газового факела с впрыском в него капель водометанольного раствора в промышленной установке. Полученные результаты удовлетворительно коррелируют с экспериментальными данными.

Ключевые слова: водометанольный раствор, зажигание, испарение, капля, факельная установка, коэффициент испарения, диффузия.

DOI 10.15372/FGV20200305

### ВВЕДЕНИЕ

Процесс горения является одним из основных в энергетике, технологиях химической и газовой промышленности. Зачастую в этих процессах участвуют отходы в виде водных растворов различных видов органического сырья и его производных, предназначенные для утилизации в условиях нанесения минимального ущерба окружающей среде [1]. Математический анализ дает возможность предварительно оценить эффективность как процесса утилизации, так и дальнейшего использования получаемого при горении тепла.

В настоящей статье представлены результаты исследования сжигания капель водометанольного раствора (ВМР) в факеле газовой горелки. Обращение к математическому моделированию в практике современного проектирования и эксплуатации теплотехнических устройств позволяет минимизировать материальные и временные затраты на поиск наиболее эффективных технологических режимов работы рассматриваемых конструкций. Повышение предсказательной способности используемых при этом моделей часто требует постоянного привлечения данных физического эксперимента, уточняющих значения применяемых в расчетах теплофизических констант. Объем-

том математического анализа в данной статье является факельная установка ГФУ-5 [2], которую используют в РФ для утилизации промышленных отходов в режиме горения (около 60 коммерческих компаний). Схематично данное устройство представлено на рис. 1.

Рассматриваемая конструкция предназначена для утилизации жидких отходов производства, впрыскиваемых через форсунку в виде капель в часть потока газовой топливной смеси. Поддержание устойчивого горения осуществляется с помощью дополнительного факела от горения другой части топливной смеси. Форма потока данной части смеси формирует картину обтекания тела потоком — эффект Коанда.

При математическом моделировании в качестве горючего рассматривался природный газ следующего объемного состава:  $\text{CH}_4$  — 98.9 %,  $\text{C}_2\text{H}_6$  — 0.12 %,  $\text{C}_3\text{H}_8$  — 0.01 %,



Рис. 1. Схема факельной установки:

1 — поступающие на утилизацию отходы, 2 — газовая топливная смесь, 3 — тело Коанда

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-79-10015).

© Наумкин А. С., Борисов Б. В., 2020.

$C_4H_{10}$  — 0.01 %,  $CO_2$  — 0.06 %,  $N_2$  — 0.9 %. В качестве отходов принят водный раствор  $CH_3OH$  с массовой долей в диапазоне  $0 \div 1$  %. Данная установка теоретически позволяет использовать ВМР как дополнительный источник тепла с контролируемой температурой горения для минимизации доли оксидов азота в продуктах реакции.

Характеристики факела и время сгорания определяются двумя самыми медленными процессами: испарением капель и диффузией паров [3]. И если основные характеристики диффузии известны из справочной литературы, то характеристики испарения капель ВМР (в том числе массовая скорость испарения в данных условиях) требуют дополнительного экспериментального подтверждения.

## ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Физическое моделирование процесса испарения капель ВМР проводилось на стенде, схема которого представлена на рис. 2.

Для расширения области применения результатов исследований диапазон массового содержания метанола в капле ВМР был увеличен в экспериментах до 40 %. Для определения скорости испарения капель последние помещались в цилиндрическую муфельную печь с размерами нагреваемой области  $48 \times 450$  мм. Температура внутри печи поддерживалась постоянной с помощью терморегулятора. Испарение капель проводилось при температурах 600 и 700 °С, что примерно соответствует условиям той области факела, в которой происходит испарение капель. Если в серии из пяти экспериментов, проводившихся в одинаковых условиях, случайные погрешности, определенные по стандартной процедуре, не превышали 0.33 от уровня систематических, проведение экспериментов в данных условиях прекращалось. Результаты обрабатывались с доверительной вероятностью 95 %. Процесс регистрировался

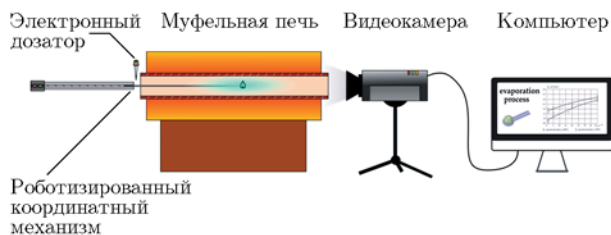


Рис. 2. Схема экспериментального стенда

высокоскоростной видеокамерой Phantom v411 (скорость 4200 кадр/с, разрешение  $1280 \times 800$  пикселей). С помощью программного комплекса Tema Automotive [4] проводился покадровый просмотр результатов и выполнялись оценки изменения геометрии, по которым рассчитывались объемная и массовая скорости испарения капли. Для снижения влияния систематической погрешности обработки размеров капли использовался программный комплекс для обработки кадров Phantom camera control. Определение объема капли реализовано в программном комплексе Drop shape analysis (KRÜSS GmbH, Германия). Экспериментально зарегистрировать характеристики тепло- и массообмена в данном объекте чрезвычайно затруднительно, поэтому нестационарные поля температур определялись по результатам численного моделирования.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Использовались следующие основные допущения:

- 1) окружающая каплю среда является смесью паров и воздуха в состоянии идеального газа;
- 2) массовый состав паров соответствует составу раствора в капле;
- 3) процессы тепло- и массообмена обладают сферической симметрией.

Математический анализ процесса испарения капли и численное моделирование горения факела газовой горелки проводились в среде ANSYS. Рассматривалась сферическая капля ВМР радиусом  $r_d$ , помещенная в область радиусом  $r_\infty \gg r_d$  с постоянной температурой внешней поверхности, соответствующей нагреву муфельной печи (рис. 3). Вследствие малых

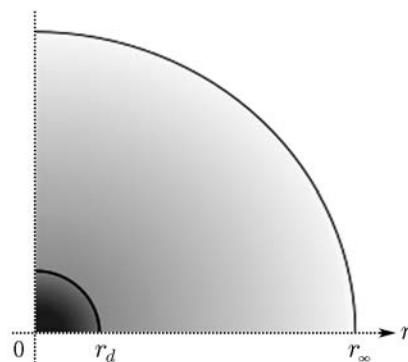


Рис. 3. Область моделирования процесса испарения ВМР

размеров и массы капли температура в печи в процессе испарения меняется незначительно. Поэтому теплофизические свойства газа и паров принимаются постоянными и соответствуют начальной температуре муфельной печи  $T_2$ . В начальный момент времени капля ВМР с постоянной по объему температурой  $T_1$  помещается в муфельную печь. Газовая среда и капля рассматриваются как диатермические среды.

В этих предположениях температурное поле в капле ВМР  $T(r, t)$  определяется уравнением

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla\lambda\nabla(T), \quad (1)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость,  $\rho$  — плотность,  $\lambda$  — теплопроводность.

Начальные условия:

$$T(r, 0) = \begin{cases} T_1 & \text{при } 0 < r < r_{d-}, \\ T_2 & \text{при } r_{d+} < r < r_{\infty}. \end{cases} \quad (2)$$

Граничные условия:

$$\left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=0} = 0, \quad (3)$$

$$-\lambda\left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=r_{d-}} = -\lambda\left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=r_{d+}} + Q_{vap}\rho_{liq}U_d, \quad (4)$$

где  $Q_{vap}$  — удельная теплота парообразования ВМР,  $\rho_{liq}$  — плотность ВМР,  $U_d$  — скорость изменения радиуса капли.

Искомая скорость  $U_d$  определяется полями температур в областях  $0 < r < r_{d-}$  и  $r_{d+} < r < r_{d\infty}$ . Удельная теплота парообразования ВМР и теплофизические параметры в парогазовой области  $r_{d+} < r < r_{d\infty}$  вычислялись по выражениям [5–9]

$$q_{vap} = q_{vapH_2O}g_{vapH_2O} + q_{vapCH_3OH}g_{vapCH_3OH}, \quad (5)$$

$$c_p = c_{p,vap}g_{vap} + c_{p,air}g_{air}, \quad (6)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{n_{vap}}{\lambda_{vap}} + \frac{n_{air}}{\lambda_{air}}. \quad (7)$$

Здесь  $q_{vapH_2O}$ ,  $q_{vapCH_3OH}$  — теплота парообразования компонентов капли,  $g_{vapH_2O}$ ,  $g_{vapCH_3OH}$  — их массовые доли,  $g_{vap}$ ,  $g_{air}$  и  $n_{vap}$ ,  $n_{air}$  — соответственно массовые и объемные доли пара и воздуха, которые находили по формулам

$$g_{vap} = \frac{\rho_{vap}}{\rho_{vap} + \rho_{air}}, \quad g_{air} = 1 - g_{vap}, \quad (8)$$

$$n_{vap} = \frac{\rho_{vap}}{g_{vap} + M_{air} \cdot g_{air}/M_{vap}}, \quad (9)$$

$$n_{air} = 1 - n_{vap},$$

где  $M_{vap}$ ,  $M_{air}$  — молярная масса паровой и газовой фаз. Связь плотностей паровой фазы и воздуха определяется законом Дальтона [10] в соответствии с измеренным атмосферным давлением  $p_{atm}$  и температурой:

$$p_{atm} = (\rho_{vap}/M_{vap} + \rho_{air}/M_{air})RT, \quad (10)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Оценки показывают, что термогравитационной конвекцией можно пренебречь [11] и изменение концентрации пара определять только процессом диффузии, а влияние скорости перемещения внешнего радиуса капли на формирование распределений температуры и плотности пара можно не учитывать. С учетом вышперечисленных допущений поля температуры  $T(r, t)$  и плотности паровой фазы  $\rho_{vap}(r, t)$  в парогазовой области  $r_{d+} < r < r_{d\infty}$  определяются уравнениями

$$c_p\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla\lambda\nabla(T) + \nabla[(c_{p,vap} - c_{p,air})D_{vap-air}\nabla(\rho_{vap})T], \quad (11)$$

$$\frac{\partial\rho_{vap}}{\partial t} = \nabla D_{vap-air}\nabla(\rho_{vap}), \quad (12)$$

где  $D_{vap-air}$  — коэффициент бинарной диффузии пара в воздухе. Как уже было сказано (см. (2)), в начальный момент времени температура во всей парогазовой области  $r_{d+} < r < r_{d\infty}$  равна температуре муфельной печи  $T(r, 0) = T_2$ , а пары отсутствуют,  $\rho_{vap}(r, 0) = 0$ .

Граничные условия:

$$-\lambda\left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=r_{d-}} = -\lambda\left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=r_{d+}} + Q_{vap}\rho_{liq}U_d, \quad (13)$$

$$T|_{r=r_{d-}} = T|_{r=r_{d+}}, \quad \left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=r_{\infty}} = 0,$$

$$\rho_{vap}|_{r=r_d} = \rho_{vap,s}, \quad \left.\frac{\partial\rho_{vap}}{\partial r}\right|_{r=r_{\infty}} = 0, \quad (14)$$

где  $\rho_{vap,s}$  — плотность насыщенных паров при температуре поверхности капли.

Скорость испарения согласно модели Герца — Кнудсена определяется парциальным давлением паров [12] и приводится к виду, предложенному в [13]:

$$\rho_{liq} U_d = \frac{2Ac}{2 - Ac} \sqrt{\frac{M_{vap}}{2\pi RT_{vap,s}}} Q_{vap} \times \frac{\rho_{vap}\rho_{liq}}{\rho_{liq} - \rho_{vap}} \frac{T - T_{vap,s}}{T_{vap,s}}, \quad (15)$$

где  $Ac$  — безразмерный коэффициент, определяющий процесс испарения.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ ВМР

На рис. 4–6 представлены результаты физического и математического моделирования испарения капли ВМР в полости муфельной печи. Исследовалось влияние на параметры испарения массовой доли метанола в капле  $g_{CH_3OH}$  и температуры внутренней поверхности муфельной печи ( $T_{st}$ ). На первом этапе проводился сравнительный анализ физического и математического экспериментов для уточнения значения  $Ac$ , которое обеспечивало наименьшее различие результатов эксперимента и расчета в широком диапазоне содержания метанола в водном растворе.

Оценки, проведенные по результатам экспериментального определения характеристик процесса испарения капель воды, движущихся сквозь высокотемпературную газовую среду [14–18], показывают, что значения коэффициента  $Ac$  в соотношении (15) для воды в условиях описываемых в настоящей статье экспе-

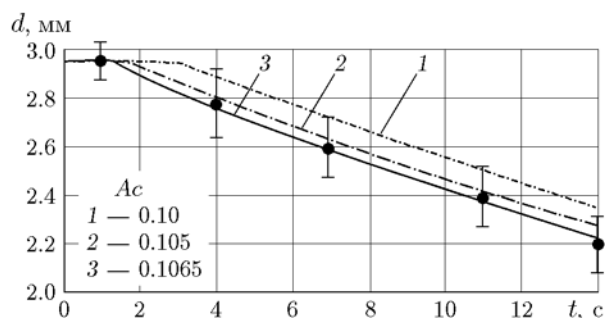


Рис. 4. Динамика изменения диаметра капли ВМР при испарении по результатам физического (точки) и численного (линии 1–3) моделирования

риментов лежат в диапазоне  $0.10 \div 0.108$ . Эксперименты проводились при начальном диаметре капли ВМР 3 мм, содержании метанола  $g_{CH_3OH} = 0.01$ , начальной температуре  $T_1 = 297$  К. Как показывает анализ результатов экспериментов, представленных на рис. 4, 5, наиболее близкие им результаты расчетов получены при  $Ac = 0.1065$ .

Средняя скорость изменения радиуса на участке между значениями в точках  $i$  и  $i + 1$  рассчитывалась по соотношению [19]

$$|U_d| = \frac{V_{i+1} - V_i}{\Delta t(s_i + s_{i+1})/2} = \frac{(4/3)\pi(r_{i+1}^3 - r_i^3)}{\Delta t \cdot 4\pi(r_{i+1}^2 + r_i^2)/2} = \frac{2(r_{i+1}^3 - r_i^3)}{\Delta t 3 \cdot (r_{i+1}^2 + r_i^2)}. \quad (16)$$

Результаты представлены на рис. 5. Локальный максимум скорости наблюдается на кривых, полученных как в результате математического моделирования, так и при обработке данных физических экспериментов. Этот максимум объясняется возникновением при внесении капли ВМР в полость муфельной печи значительных градиентов концентрации и температуры вблизи поверхности капли, что сопровождается интенсивной диффузией массы и тепла. По мере формирования квазистационарных профилей температуры и плотности в области  $r_{d+} < r < r_{d\infty}$  скорость испарения стабилизируется. Значения стабилизированной скорости испарения не слишком сильно отличаются при различных коэффициентах

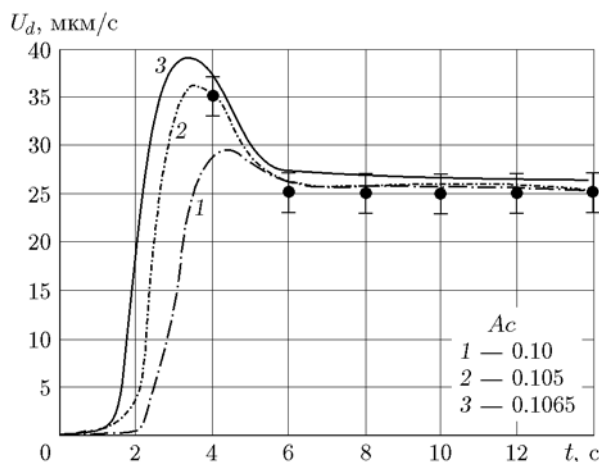


Рис. 5. Динамика изменения скорости испарения капли ВМР по результатам физического (точки) и численного (линии 1–3) моделирования

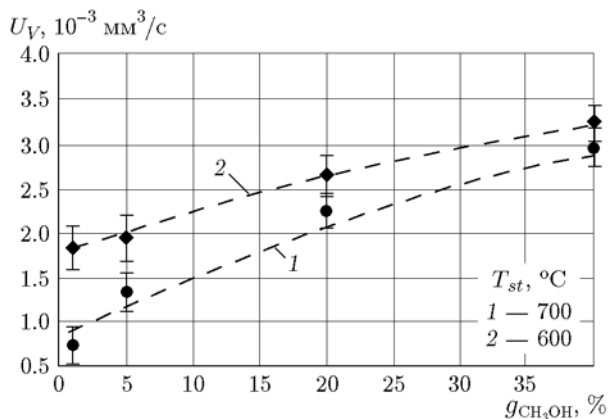


Рис. 6. Зависимость стабилизированной объемной скорости испарения капли ВМР от массовой доли метанола в растворе и температуры в муфельной печи, определенной по результатам физического (точки) и численного (линии) моделирования

Ас. В дальнейших расчетах принимается  $A_c = 0.1065$ , при этом значении более точно относительно экспериментальных данных определяется время начала испарения (см. рис. 4, 5).

На рис. 6 представлены зависимости модуля скорости изменения объема капли ВМР  $U_V$  после стабилизации процесса испарения от массовой доли метанола в растворе и от температуры в полости муфельной печи.

Использование значения  $A_c$ , полученного в растворе с малым содержанием  $\text{CH}_3\text{OH}$ , для расчетов до  $g_{\text{CH}_3\text{OH}} = 40 \%$  ведет к удовлетворительному согласию с экспериментами, что дает право предположить возможность применения этих результатов для моделирования параметров испарения водных растворов с другими горючими жидкостями. Удовлетворительное согласие результатов математического моделирования испарения капли ВМР с экспериментальными данными позволяет использовать результаты предварительного исследования этого процесса в численном моделировании взаимодействия капель ВМР и факела газовой горелки.

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЖИГАНИЯ ВМР В ФАКЕЛЕ ГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ

Рассматривалась стационарная картина формирования факела. Часть топливной смеси, направленная на распыление жидкости, движется внутри цилиндрической трубы (см. рис. 1). Раствор поступает из соосно распо-

женной трубы меньшего диаметра в газовый поток через форсунку. Остатки топливной смеси, огибая тело Коанда, формируют вторую струю, горение которой инициирует и стабилизирует горение топлива в процессе утилизации ВМР.

Процессы распыла, испарения, зажигания и горения рассматриваются в стационарном режиме и для простоты анализа в двумерной плоской постановке. Вследствие малых размеров, капли движутся со скоростью парогазового потока. Приход паров за счет испарения капель учитывается в виде объемной плотности внутреннего источника массы  $S_m$ , определяемой в соответствии с соотношением (15) и экспериментальными данными по скорости испарения капли ВМР. Динамика изменения размеров капель за счет испарения моделируется уравнением

$$\frac{\partial r_d}{\partial t} = U_d. \quad (17)$$

С использованием траекторного подхода определяется распределение радиуса капель в области факела, от начального при вылете из горелки до нулевого значения при полном испарении капель. Массовая доля капель в потоке является одной из переменных моделирования, определяемых из решения системы нестационарных уравнений неразрывности, движения и энергии, описывающей процессы перемешивания, испарения и химического взаимодействия, с использованием пакета ANSYS Fluent [20]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) &= S_m, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) &= -\nabla p + \nabla(\bar{\tau}) + \rho \vec{g}, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \nabla(\vec{v}(\rho e + p)) &= \\ &= -\nabla \left( \sum_i h_i J_i \right) + \nabla \lambda \nabla(T) + S_h, \end{aligned} \quad (18)$$

где  $\bar{\tau} = \mu[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - (2/3)\nabla \vec{v} I]$  — тензор вязких напряжений;  $I$  — единичный тензор;  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $t$  — время, с;  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\vec{v}$  — вектор скорости, м/с;  $J$  — плотность диффузионного потока массы, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $p$  — давление, Па;  $e = h - p/\rho + v^2/2$  — удельная полная энергия, Дж/кг;  $h = \sum_i h_i J_i$  — удельная

полная энтальпия, Дж/кг;  $h_i = \int_{T_{ref}}^T c_{p,i} dT$  —

удельная энтальпия  $i$ -го компонента, Дж/кг;  $T_{ref} = 298.15$  К — опорная температура;  $c_{p,i}$  — удельная изобарная теплоемкость компонента  $i$ , Дж/(К·кг);  $S_m = \sum_i^N S_i$  — объемная плотность внутреннего источника массы, кг/(м<sup>3</sup>·с);  $S_h = -\sum_i^N h_i^0 R_i / V_{M_i}$  — объемная мощность теплового эффекта химической реакции, Дж/(м<sup>3</sup>·с);  $R_i$  — объемная скорость реакции образования вещества  $i$ , моль/(м<sup>3</sup>·с);  $h_i^0$  — энтальпия образования компонента  $i$ , Дж/моль;  $V_{M_i}$  — молярный объем компонента  $i$ .

Процесс диффузии многокомпонентной смеси моделируется уравнениями Максвелла — Стефана в предположении малого диффузионного давления [21–23]:

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{X_i X_j}{D_{ij}} (\vec{v}_j^d - \vec{v}_i^d) = d_i - \frac{\nabla T}{T} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{X_i X_j}{D_{ij}} \left( \frac{D_{T,j}}{\rho_j} - \frac{D_{T,i}}{\rho_i} \right), \quad (19)$$

где  $X_i$  — молярная доля  $i$ -го компонента;  $v_i^d$  — скорость диффузии  $i$ -го компонента, м/с;  $D_{ij}$  — коэффициент бинарной массовой диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $D_T$  — коэффициент тепловой диффузии, м<sup>2</sup>/с.

В рамках идеального газа коэффициент диффузии Максвелла полагается равным коэффициенту бинарной диффузии без учета гравитационного взаимодействия молекул и эффекта бародиффузии:

$$\vec{J}_i = \rho_i \vec{v}_i^d, \quad (20)$$

$$d_i = \nabla X_i, \quad (21)$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{X_i X_j}{D_{ij}} \left( \frac{\vec{J}_j}{\rho_j} - \frac{\vec{J}_i}{\rho_i} \right) = \nabla X_i - \frac{\nabla T}{T} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{X_i X_j}{D_{ij}} \left( \frac{D_{T,j}}{\rho_j} - \frac{D_{T,i}}{\rho_i} \right). \quad (22)$$

Вектор диффузионного потока массы  $\vec{J}_i$  согласно закону Фика имеет вид

$$\vec{J}_i = - \sum_{j=1}^{N-1} \left( \rho D_{i,m} + \frac{\mu t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T}, \quad (23)$$

где  $Y_i$  — массовая доля компонента  $i$ ;  $Sc_t$  — число Шмидта для турбулентного потока;  $\mu t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon$  — коэффициент турбулентной вязкости, Па·с;  $C_\mu = 0.09$  — постоянная [22–24];  $\epsilon$  — скорость диссипации, м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>;  $k$  — кинетическая энергия турбулентности, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;  $D_{i,m} = (1 - X_i) / \sum_{ij \neq i} (X_i / D_{ij})$  — коэффициент массовой диффузии для всех видов компонента  $i$  в смеси, м<sup>2</sup>/с.

Вектор диффузионного потока компонента массы сводится к обыкновенному уравнению через обобщенные коэффициенты диффузии  $A$  и  $B$ , в котором коэффициент диффузии  $i$ -го компонента в  $j$ -м определяется как

$$D_{ij} = [D] = [A]^{-1} [B]. \quad (24)$$

Матрицы обобщенных коэффициентов диффузии Фика ( $A$ ,  $B$ ) определяются согласно работе [24]:

$$A_{ii} = - \left( \frac{X_i}{D_{i,N}} \frac{M_w}{M_{w,N}} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{X_i}{D_{ij}} \frac{M_w}{M_{w,i}} \right), \quad (25)$$

$$A_{ij} = X_i \left( \frac{1}{D_{ij}} \frac{M_w}{M_{w,j}} - \frac{1}{D_{i,N}} \frac{M_w}{M_{w,N}} \right), \quad (26)$$

$$B_{ii} = - \left( X_i \frac{M_w}{M_{w,j}} + (1 - X_i) \frac{M_w}{M_{w,i}} \right), \quad (27)$$

$$B_{ij} = X_i \left( \frac{M_w}{M_{w,j}} - \frac{M_w}{M_{w,N}} \right), \quad (28)$$

где  $M_w$  — молекулярная масса, кг/кмоль.

Необходимые коэффициенты термодиффузии определяются по соотношению [25]

$$D_{T,i} = -2.59 \cdot 10^{-7} T^{0.659} \times \left( M_{w,i}^{0.511} X_i / \sum_{i=1}^N M_{w,i}^{0.511} X_i - Y_i \right) \times \left( \sum_{i=1}^N M_{w,i}^{0.511} X_i / \sum_{i=1}^N M_{w,i}^{0.489} X_i \right). \quad (29)$$

Турбулентное течение описывается  $k$ - $\epsilon$ -моделью, включающей в себя уравнения переноса турбулентной кинетической энергии и скорости диссипации турбулентной кинетической энергии [26]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k v_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon, \quad (30)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon v_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (31)$$

где  $G_k = -\rho \overline{v'_i v'_j} \frac{\partial v_j}{\partial x_j}$  — скорость образования кинетической энергии турбулентности средними градиентами скорости, кг/(м·с<sup>3</sup>);  $C_{1\epsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\epsilon} = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$  — эмпирические константы;  $\sigma_k = 1.0$  — эмпирическая константа;  $\sigma_\epsilon = 1.3$  — эмпирическая константа [23].

Моделирование химических реакций проводится в соответствии с уравнением сохранения массы для компонента  $i$ :

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \vec{J}_i + R_i + S_i, \quad (32)$$

где  $S_i = Y_i S_m$  — скорость образования массы  $i$ -го компонента смеси при испарении в соответствии с результатами предыдущих исследований, кг/(с·м<sup>3</sup>).

Горение моделируется в программном комплексе ANSYS Fluent как одна брутто-реакция для каждого горючего компонента. Скорости реакций определяются по модели вихревой диссипации, в соответствии с которой для скорости реакций выбирается меньшая из скоростей диффузии и протекания реакций в соответствии с формулой Аррениуса [27]:

$$R_{i,r} = \nu'_{i,r} M_{w,i} A_0 \rho \frac{\epsilon}{k} \min \left( \frac{Y_j}{\nu'_{j,r} M_{w,j}} \right), \quad (33)$$

$R_{i,r} =$

$$= \nu'_{i,r} M_{w,i} A_0 B_0 \rho \frac{\epsilon}{k} \sum_j Y_j / \sum_j \nu''_{j,r} M_{w,j}, \quad (34)$$

где  $A_0 = 4.0$ ,  $B_0 = 0.5$  — эмпирические константы;  $Y_j$  в (33) — массовая доля любого продукта реакции  $j$ ;  $Y_j$  в (34) — массовая доля конкретного компонента реакции  $j$ ;  $N$  — количество реакций;  $\nu'_{j,r}$  — стехиометрический коэффициент для реагента  $j$  в реакции  $r$ ;  $\nu''_{j,r}$  — стехиометрический коэффициент для продукта  $j$  в реакции  $r$ ;  $M_{w,j}$  — молекулярная масса  $j$ -го компонента, кг/кмоль.

Результирующая скорость химических реакции для вещества  $i$  вычисляется как сумма скоростей каждой реакции:

$$R_i = M_{w,i} \sum_{r=1}^{N_r} R_{i,r}. \quad (35)$$

Теплота реакции для разных видов топлива определяется по известной молярной теплотворной способности:

$$\Delta h^0 = \sum_{r=1}^N h_i^0 (\nu''_{i,r} - \nu'_{i,r}), \quad (36)$$

где  $h_i^0$  — молярная энтальпия состояния  $i$ -го компонента, Дж/кмоль.

В начале процесса расчетная область заполнена неподвижным воздухом с начальными температурой и давлением.

Граничные условия заданы следующие:

- постоянная плотность расхода компонентов через сопло и полость с телом Коанда в виде  $\frac{\partial v}{\partial n} = \text{const}$ , при этом константа соответствует расходным показателям;
- условия адиабатичности и прилипания на поверхности почвы;
- мягкие условия для всех функций на границах с окружающей средой.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФАКЕЛА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве необходимого горючего рассматривается природный газ следующего объемного состава: CH<sub>4</sub> — 98.9 %, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> — 0.12 %, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> — 0.01 %, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> — 0.01 %, CO<sub>2</sub> — 0.06 %, N<sub>2</sub> — 0.9 %.

Расход создаваемой топливной смеси и промышленных стоков в ГФУ-5 контролируется на пульте управления и в норме составляет: горючего газа на распыление и протекание по телу Коанда (см. рис. 1) 0.1478 и 0.0739 м<sup>3</sup>/с соответственно; раствора ВМР — 0.278 кг/с.

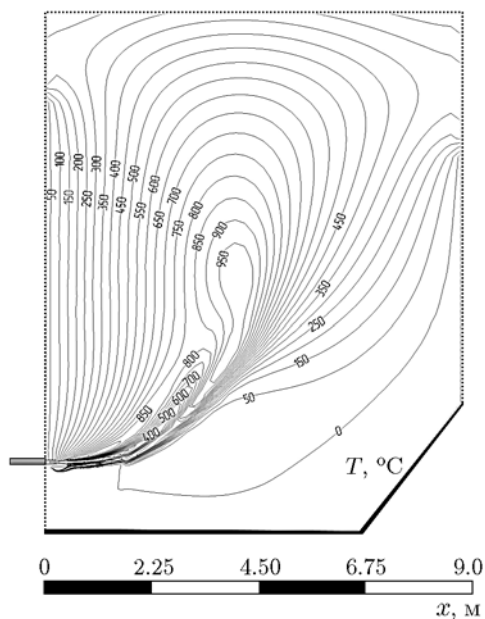


Рис. 7. Поле температуры в области факела ГФУ:

пунктир — воздух, сплошная толстая линия — поверхность почвы

Численное моделирование проводится в соответствии с зарегистрированными экспериментально параметрами: массовый состав раствора — 99.67 %  $\text{H}_2\text{O}$ , 0.33 %  $\text{CH}_3\text{OH}$ ; диаметр образующихся капель при заданном соотношении газовой и жидкой фаз на выходе из горелки — 55 мкм.

На рис. 7, 8 представлены расчетные распределения температуры и относительной плотности горячего газа в зоне факела ГФУ. Форма факела формируется в том числе под воздействием наклонного участка поверхности почвы (бруствера) для ограничения горизонтального распространения факела.

Форма и характерные геометрические размеры факела, определяемые полями относительной плотности метанола и температуры, соответствуют друг другу и характеристикам факела реальной горелки, представленного на рис. 9. Данная фотография сделана на полигоне, параметры горелки по расходу компонентов ВМР и топливной смеси соответствуют использованным при расчете факела. Фотография дополнена основными геометрическими размерами факела, которые определялись по контурным отметкам на местности. Удовлетворительная степень адекватности математического моделирования реальным процес-

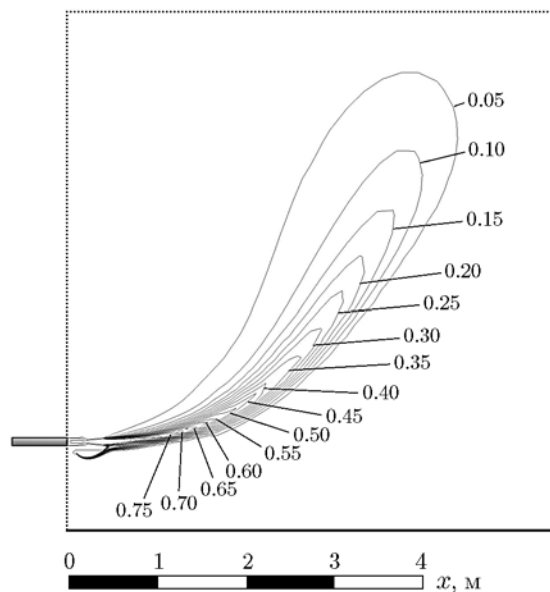


Рис. 8. Поле безразмерной плотности горячего газа в области факела ГФУ:

пунктир — воздух, сплошная толстая линия — поверхность почвы

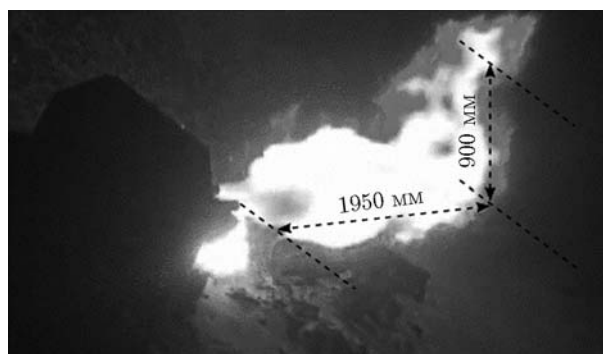


Рис. 9. Фотография факела ГФУ:

размеры светящейся области определены по контурным указателям на местности

сам работы ГФУ обеспечивается в том числе достаточным уровнем предварительных исследований наиболее длительного процесса — испарения капель ВМР.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулирована математическая модель процесса испарения частицы водометанольного раствора. При сравнительном анализе результатов физического и математического моделирования определены основные характеристики



рассматриваемого процесса для использования в расчетных методиках.

Приведены результаты численного моделирования и эксперимента на промышленной установке ГФУ-5 с впрыском в факел водометанольного раствора, при этом в расчетах использовались результаты исследования испарения данного раствора. Удовлетворительное соответствие моделирования и эксперимента свидетельствует о возможности применения представленного метода для описания рассматриваемого процесса.

Результаты данных исследований будут полезны в предварительных расчетах газовых горелок, в которых предполагается впрыск водометанольного или аналогичных ему растворов горючих веществ в воде. При этом, как показал анализ экспериментальных данных, для предварительных расчетов параметров процесса испарения водных растворов горючих веществ, аналогичных метанолу, можно использовать характеристики процесса испарения воды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Naumkin A. S., Borisov B. V., Nigay A. G. Influence of water-methanol solution additives on hydrocarbon fuel combustion in burner // MATEC Web of Conferences. — 2018. — V. 194. — 01042.
2. Созонов Н. А. Установки термической утилизации отходов ООО «ТюменНИИгипрогаз» // Экспозиция: нефть, газ. — 2014. — № 4. — С. 90–91.
3. Сполдинг Д. Б. Основы теории горения: пер. с англ. — М.: Гос. энерг. изд-во, 1959.
4. <http://www.imagesystems.se/tema/automotive>.
5. Виленский Т. В. Расчет горения водоугольных смесей // Энергетика. — 1988. — № 7. — С. 90–93.
6. Чепмен С., Каулинг Т. Математическая теория неоднородных газов: пер. с англ. — М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
7. Высокоморная О. В., Пискунов М. В., Стрижак П. А. Исследование условий интенсивного испарения неоднородных капель воды в высокотемпературной газовой среде // XI Всерос. съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. — 2015. — С. 825–827.
8. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: справочное пособие: пер. с англ. — 3-е изд., перераб. и доп. — Л.: Химия, 1982.
9. Millat J., Dymond J. H., Nieto de Castro C. A. Transport properties of fluids: their correlation, prediction and estimation. — Cambridge Univ. Press, 1996.
10. Гендугов В. М., Смирнов Н. Н., Тюренкова В. В. Решение задачи диффузионного горения капли с учетом нескольких независимых реакций // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 6. — С. 31–40.
11. Dalton J. Essay IV. On the expansion of elastic fluids by heat // Memoirs of the Literary and Philosophical Society of Manchester. — 1802. — V. 5, pt. 2. — P. 595–602.
12. Haut B., Colinet P. Surface-tension-driven instability of a liquid layer evaporating into an inert gas // J. Colloid Interface Sci. — 2005. — V. 285, N 1. — P. 296–305.
13. Lee W. H. Computational methods for two-phase flow and particle transport // Singapore: World Scient. Publ. Co., 2013.
14. Кузнецов Г. В., Куйбин П. А., Стрижак П. А. Оценка численных значений констант испарения капель воды, движущихся в потоке высокотемпературных газов // Теплофизика высоких температур. — 2015. — Т. 53, № 2. — С. 264–269.
15. Волков Р. С., Высокоморная О. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Экспериментальное исследование изменения массы капель воды при их движении через высокотемпературные продукты сгорания // Инж.-физ. журн. — 2013. — Т. 86, № 6. — С. 1327–1332.
16. Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Влияние формы капли воды на результаты математического моделирования ее испарения при движении через высокотемпературные продукты сгорания // Тепловые процессы в технике. — 2013. — Т. 5, № 6. — С. 254–261.
17. Стрижак П. А. Влияние распределения капель в «водяном снаряде» на температуру и концентрацию продуктов сгорания в его следе // Инж.-физ. журн. — 2013. — Т. 86, № 4. — С. 839–848.
18. Стрижак П. А. Численное исследование условий испарения совокупности капель воды при движении в высокотемпературной газовой среде // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 8. — С. 26–31.
19. Gatapova E. Ya., Semenov A. A., Zaitsev D. V., Kabov O. A. Evaporation of a sessile water drop on a heated surface with controlled wettability // Colloids Surf., A: Physicochem. and Eng. Aspects. — 2014. — V. 441. — P. 776–785.
20. ANSYS FLUENT 14.0 Tutorial Guide. — ANSYS, Inc. Southpointe, 2011.
21. Batchelor G. K. An Introduction to Fluid Dynamics. — Cambridge Univ. Press, 1967.
22. Merk H. J. The macroscopic equations for simultaneous heat and mass transfer in isotropic, continuous and closed systems // Appl. Sci. Res. — 1958. — V. 8, N 1. — P. 73–99.

23. **Launder B. E., Spalding D. B.** Lectures in Mathematical Models of Turbulence. — London: Academic Press, 1972.
24. **Taylor R., Krishna R.** Multicomponent Mass Transfer. — New York: John Wiley & Sons, 1993.
25. **Kuo K. K.** Principles of Combustion. — New York: John Wiley & Sons, 1986.
26. **Shih T.-H., Liou W. W., Shabbir A., Yang Z., Zhu J.** A new  $k-\varepsilon$  eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows — model development and validation // Comput. Fluids. — 1995. — V. 24, N 3. — P. 227–238.
27. **Magnussen B. F., Hjertager B. H.** On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion // Symp. (Int.) Combust. — 1977. — V. 16, N 1. — P. 719–729.

*Поступила в редакцию 01.04.2019.*

*После доработки 17.12.2019.*

*Принята к публикации 24.12.2019.*

---