

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- и МАССООБМЕНА им. А. В. ЛЫКОВА
Журнал основан в январе 1958 г.

ТФЖ

И
НЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

JOURNAL
OF ENGINEERING PHYSICS
AND THERMOPHYSICS

Отдельный оттиск
Offprint

Том 88, № 1

Vol. 88, No. 1

ЯНВАРЬ–ФЕВРАЛЬ
JANUARY–FEBRUARY

2015

ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в январе 1958 г.

2015. ТОМ 88, № 1 (ЯНВАРЬ–ФЕВРАЛЬ)

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ДИСПЕРСНЫХ И ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Пицуха Е. А., Теплицкий Ю. С., Бородуля В. А. Некоторые закономерности закрученных двухфазных течений в надслоевом пространстве кипящего слоя мелкодисперсных частиц	3
Тукмаков А. Л. Динамика коагулирующей полидисперсной газозвеси в нелинейном волновом поле акустического резонатора.....	11
Диденко В. Н., Касимов Р. З., Попов Д. Н. Методика расчета процессов плавления и отвердевания теплоаккумулирующих материалов в мелкодисперсных капсулах.....	20
Кухленко А. А., Орлов С. Е., Иванова Д. Б., Василюшин М. С. Исследование процесса растворения полидисперсных материалов в установке с роторно-пульсационным аппаратом.....	25
Гринчик Н. Н., Адамович А. Л., Кизина О. А., Харма У. М. Моделирование тепловлагопереноса в древесине при досушке энергией СВЧ-поля	37
Архипов В. А., Бондарчук С. С., Усанина А. С., Шрагер Г. Р. Влияние вязкости жидкости на динамику растекания капли.....	43
Bennaceur S., Draoui B., Touati B., Benseddik A., Saad A., and Bennamoun L. Determination of the Moisture-Sorption Isotherms and Isosteric Heat of Henna Leaves	53
Ольшанский А. И., Ольшанский В. И., Жерносек С. В. Исследование влияния критериев подобия теплообмена на процесс сушки технических тканей термоизлучением	63
Devi T. T. and Bimlesh Kumar Design of Gas–Liquid Unbaffled Stirred Tank with Concave Blade Impeller	75

НАНОСТРУКТУРЫ

Шушков С. В., Королик О. В., Мазаник А. В., Егоров А. С., Говоров М. И. Пирографитовые пленки на поверхности металла, осаждаемые в режиме перемещения зоны нагрева	87
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ПРОЦЕССАХ ГОРЕНИЯ

Порязов В. А., Крайнов А. Ю., Крайнов Д. А. Математическое моделирование горения пороха Н с добавлением порошка алюминия	93
Крайнов А. Ю. Моделирование распространения пламени метановоздушной смеси в присутствии аэрозоля воды	102
Лобода Е. Л., Касымов Д. П., Якимов А. С. Моделирование теплофизических процессов при зажигании деревянной дощечки.....	111

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Алифанов О. М., Черепанов В. В., Моржухина А. В. Математическое моделирование ультрапористых неметаллических сетчатых материалов.....	122
Алифанов О. М., Черепанов В. В., Моржухина А. В. Комплексное исследование физических свойств сетчатого стеклоуглерода	133
Штеников В. Н. Теплофизические характеристики защитного покрытия паяльного стержня.....	145
Минаков А. В., Рудяк В. Я., Гузей Д. В., Пряжников М. И., Лобасов А. С. Измерение коэффициента теплопроводности наножидкостей методом нагреваемой нити.....	148

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕПЛООБМЕН В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Горский В. В., Золотарев С. Л., Оленичева А. А. Расчетно-экспериментальные исследования уноса массы углеродного материала на сублимационном режиме его термохимического разрушения.....	161
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Кузнецов Г. В., Нагорнова Т. А., Ни А. Э. Численное моделирование сопряженного теплопереноса в замкнутой прямоугольной области в условиях радиационного подвода теплоты к горизонтальной и вертикальным поверхностям ограждающих конструкций	165
Будаи Б. Т., Касаткин Н. В. Исследование путей устранения перегрева высокоточных ОЭС.....	175

ГИДРОГАЗОДИНАМИКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Исаев С. А., Гувернюк С. В., Зубин М. А., Баранов П. А., Ермаков А. М. Численное и физическое моделирование низкоскоростного воздушного потока в диффузоре с круговой каверной при отсеке с центрального цилиндрического тела.....	182
Исаев С. А., Гортышов Ю. Ф., Гуреев В. М., Опара Ю. С., Попов И. А. Снижение лобового сопротивления большегрузных автомобилей передними и кормовыми щитовыми генераторами крупномасштабных вихрей.....	196
Лаптев А. Г., Фарахов Т. М., Дударовская О. Г. Модель массоотдачи при жидкостной экстракции в турбулентном прямотоке	203
Замураев В. П., Калинина А. П. Численно-аналитическое моделирование структуры сверхзвукового течения газа в канале переменного сечения с подводом энергии	210
Полевода И. И., Карпенчук И. В., Стриганова М. Ю., Шатило Э. Э. Модель турбулентного течения реологических растворов пенообразователей в каналах автоматических систем пожаротушения.....	220

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В РЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Снигерев Б. А. Особенности неизоэтермического истечения вязкоупругой струи из ступенчатой формирующей насадки.....	226
M. Gnaneswara Reddy Unsteady Radiative-Convective Boundary-Layer Flow of a Casson Fluid with Variable Thermal Conductivity.....	236
Kumar R. and Gupta V. Dual-Phase-Lag Model of Wave Propagation at the Interface between Elastic and Thermoelastic Diffusion Media	247

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ПЕРЕНОСА

Попов В. И. Метод релаксационных моментов для исследования нелинейных локально-неравновесных процессов переноса полимерных систем	260
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

РАЗНОЕ

Остриков О. М., Шматок Е. В. Разрушение и сопутствующие ему эффекты в ферромагнитном монокристалле Ni ₂ MnGa с эффектом памяти формы	271
Штенников В. Н. Отработка режимов полуавтоматической контактной пайки	278

ЛЮДИ НАУКИ

Николай Иванович Сыромятников (к 100-летию со дня рождения)	281
--------------------------------------------------------------------------	-----

Подготовка оригинал-макета и сопровождение компьютерной системы в Internet осуществляется в редакции "Инженерно-физического журнала", Государственное научное учреждение "Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси"

Ответственный за выпуск: Л. Н. Шемет

Подписано в печать 21.01.2015. Формат 60×84%. Бумага офисная.
Усл. печ. л. 32,66. Уч.-изд. л. 29,17. Тираж 121 экз. Зак. № 4

Государственное научное учреждение
"Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси"
220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15
Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации
№ 218 от 06.04.2009, выданное Министерством информации Республики Беларусь.
Государственное научное учреждение
"Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси"
ЛП № 02330/451 от 18.12.2013.
220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15

УДК: 536.46

А. Ю. Крайнов

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ПРИСУТСТВИИ АЭРОЗОЛЯ ВОДЫ

Сформулирована физико-математическая модель распространения пламени в горючем газе, содержащем аэрозоль воды, основанная на тепло-диффузионной модели распространения ламинарного пламени в газе и учитывающая процессы тепло- и массообмена между газовой фазой и каплями жидкости. Проведено расчетно-теоретическое исследование влияния характеристик аэрозоли воды на скорость распространения пламени в бедной метановоздушной смеси. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показало их хорошее соответствие. Сравнение эффективности использования аэрозоли воды и инертной пыли для огнепреграждения показало, что существует граничный размер дисперсной фазы, выше которой эффективность использования аэрозоли воды и инертных порошков для огнепреграждения становится одинаковой.

Ключевые слова: горючий газ, аэрозоль воды, фронт пламени, математическое моделирование.

Для огнепреграждения в пожароопасных помещениях, в выработках шахт используются распыленные порошковые огнетушащие средства или аэрозоль воды, создаваемые специальными распылительными устройствами [1]. Вода используется для создания водораспылительных завес перед фронтом горения газовой смеси [1, 2]. Согласно требованиям Правил безопасности массовая концентрация тонкодиспергированной воды должна быть не менее 300 г/м^3 . Такие завесы создаются либо специальными устройствами создания водораспылительных завес путем взрыва маленькой массы взрывчатого вещества в центре сосуда с водой (20 и 30 литров), либо высоконапорными форсуночными устройствами [1, 2]. Для прекращения горения метано-воздушной смеси стехиометрического состава необходимо ее разбавить парами воды на 30%.

Одним из показателей эффективности средств огнепреграждения является величина уменьшения скорости распространения пламени в запыленном горючем газе по сравнению со скоростью в чистом газе.

Целью данной работы является теоретическое исследование влияния массовой концентрации аэрозоли воды и среднего размера капель воды на скорость распространения пламени в нестехиометрической метановоздушной смеси.

Рассматривается полубесконечная трубка, заполненная горючим газом, в начале которой расположен источник воспламенения газовой смеси. Стенки трубки теплоизолированы или термостатированы при начальной температуре газовой смеси. На некотором расстоянии от источника в исходную смесь введен аэрозоль воды.

Математическая модель строится на основе модели [3–9]. Для решения поставленной задачи сделаем следующие предположения: капли воды равномерно распределены в облаке; размер капель одинаков (монодисперсный аэрозоль); тепло- и массообмен между газом и каплями происходит в квазистационарном режиме, процесс испарения капель воды подчиняется закону Клапейрона–Клаузиуса; скорость химической реакции описывается законом Аррениуса; распространение пламени в газе моделируется на основе теплодиффузионной модели горения в соответствии с подходом [3].

С учетом сделанных предположений запишем систему уравнений, которая представляет процесс горения в такой системе:

уравнение энергии газовой фазы

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + Q \rho_0 \rho_n k_0 e^{-\frac{E}{RT_1}} + 4\pi r_k^2 N \alpha (T_k - T_1) - \frac{4}{3} \pi N c_1 \rho_k \frac{dr_k^3}{dt} (T_k - T_1) - \frac{2\alpha_w}{r_t} (T_1 - T_w), \quad (1)$$

уравнение энергии капли

$$\frac{4}{3} \pi r_k^3 c_k \rho_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = -4\pi r_k^2 \alpha (T_k - T_1) + \frac{4}{3} \pi \rho_k \frac{dr_k^3}{dt} L, \quad (2)$$

уравнение для размера капель

$$\frac{4}{3} \pi \rho_k \frac{dr_k^3}{dt} = 4\pi r_k^2 \beta_m (\rho_v^\infty - \rho_v^n), \quad (3)$$

уравнение для плотности окислителя газовой фазы

$$\frac{\partial \rho_o}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \rho_o}{\partial x^2} - n_o \rho_o \rho_n k_0 e^{-\frac{E}{RT_1}}, \quad (4)$$

уравнение для плотности горючего газовой фазы

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \rho_n}{\partial x^2} - n_n \rho_o \rho_n k_0 e^{-\frac{E}{RT_1}}, \quad (5)$$

уравнение для плотности паров воды

$$\frac{\partial \rho_v^\infty}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \rho_v^\infty}{\partial x^2} - 4\pi r_k^2 N \beta_m (\rho_v^\infty - \rho_v^n), \quad (6)$$

уравнение сохранения массы смеси

$$\frac{d}{dt} [\rho_1 + \rho_k \frac{4}{3} \pi r_k^3 N] = 0, \quad (7)$$

уравнение плотности насыщенных паров над поверхностью капли

$$\rho_v^n = \frac{P_{atm}}{RT} e^{\left(-\frac{L}{RT} + \frac{L}{RT_{kmn}} \right)}, \quad (8)$$

$$\rho_1 = \rho_o + \rho_n + \rho_{in} + \rho_v^\infty,$$

начальные

$$T_1(x, 0) = T_k(x, 0) = T_0, \quad r_k(x, 0) = r_{k,0}, \quad \rho_o(x, 0) = \rho_{o,0}, \quad \rho_n(x, 0) = \rho_{n,0}, \quad \rho_v^\infty(x, 0) = \rho_{v,0} \quad (9)$$

и граничные условия

$$T_1(0, t) = T_a, \quad \frac{\partial T_1(\infty, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \rho_o(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial \rho_o(\infty, t)}{\partial x} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho_n(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial \rho_n(\infty, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \rho_v^\infty(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial \rho_v^\infty(\infty, t)}{\partial x} = 0.$$

Система уравнений (1)–(8) описывает распространение фронта пламени в горючем газе, в котором рас-

пылен аэрозоль воды. При задании L и β_m равными нулю система уравнений будет описывать распространение фронта пламени в горючем газе при распылении в нем частиц инертной пыли [4, 5].

Система уравнений (1)–(8) имеет много теплофизических величин и формально-кинетических характеристик. Анализировать ее удобнее в безразмерных переменных и параметрах. Выберем в качестве масштабов, как это принято в теории горения, следующие величины: $x_* = \sqrt{\frac{\lambda}{c_1 \rho_1}} t_*$ — масштаб координаты;

$t_* = \frac{c_1 R T_*^2}{E Q \rho_* k_0 e^{-\frac{E}{RT_*} Y_{o,0} Y_{n,0}}}$ — масштаб времени, $Y_{o,0} = \frac{\rho_{o,0}}{\rho_*}$, $Y_{n,0} = \frac{\rho_{n,0}}{\rho_*}$; $\rho_* = \rho_{1,0}$ — масштаб плотности

(начальная плотность газа); $\frac{R T_*^2}{E}$ — масштаб температуры, где $T_* = T_a = \frac{Q Y_{n,0}}{c_1} + T_0$ — адиабатическая температура сгорания газовой смеси. Введем безразмерные переменные: $\tau = \frac{t}{t_*}$ — безразмерное время; $\xi = \frac{x}{x_*}$ —

безразмерная пространственная координата; $\bar{\rho}_1 = \frac{\rho_1}{\rho_*}$ — безразмерная плотность газа; $\bar{\rho}_v^\infty = \frac{\rho_v^\infty}{\rho_*}$ — безразмер-

ная парциальная плотность паров воды; $\theta_1 = \frac{E}{R T_*^2} (T_1 - T_*)$, $\theta_k = \frac{E}{R T_*^2} (T_k - T_*)$ — безразмерные температу-

ры газа и капель; $C_o = \frac{\rho_o}{\rho_{o,0}}$ — концентрация окислителя; $C_n = \frac{\rho_n}{\rho_{n,0}}$ — концентрация горючего; $\bar{r}_k = \frac{r_k}{r_{k,0}}$ — безразмерный радиус капли.

Система уравнений (1)–(8), записанная в безразмерных переменных, принимает вид:

$$\bar{\rho}_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial \xi^2} + C_o C_n e^{-\frac{\theta_1}{1+\beta \theta_1}} + \frac{B}{\chi} \bar{r}_k (\theta_k - \theta_1) - \frac{B}{C} \frac{d \bar{r}_k^3}{d \tau} (\theta_k - \theta_1) - \omega (\theta_1 - \theta_w), \quad (11)$$

$$\bar{r}_k^3 \frac{\partial \theta_k}{\partial \tau} = -\frac{\bar{r}_k}{\chi} (\theta_k - \theta_1) + P \frac{d \bar{r}_k^3}{d \tau}, \quad (12)$$

$$\frac{d \bar{r}_k^3}{d \tau} = \bar{r}_k \frac{Le C}{\chi} (\bar{\rho}_v^\infty - \bar{\rho}_v^n), \quad (13)$$

$$\frac{\partial C_o}{\partial \tau} = Le \frac{\partial^2 C_o}{\partial \xi^2} - \gamma C_o C_n e^{-\frac{\theta_1}{1+\beta \theta_1}}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial C_n}{\partial \tau} = Le \frac{\partial^2 C_n}{\partial \xi^2} - G \gamma C_o C_n e^{-\frac{\theta_1}{1+\beta \theta_1}}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_v^\infty}{\partial \tau} = Le \frac{\partial^2 \bar{\rho}_v^\infty}{\partial \xi^2} - \frac{Le B}{\chi} \bar{r}_k (\bar{\rho}_v^\infty - \bar{\rho}_v^n), \quad (16)$$

$$\frac{d}{d \tau} \left(\bar{\rho}_1 + \bar{r}_k^3 \frac{B}{C} \right) = 0, \quad (17)$$

$$\bar{\rho}_v^n = J \frac{e^{\frac{L_E \theta_1}{(1+\beta \theta_1)}}}{(1 + \beta \theta_1)}. \quad (18)$$

Начальные условия:

$$\theta_1(\xi, 0) = \theta_k(\xi, 0) = -1/\gamma, \quad \bar{r}_k(\xi, 0) = 1, \quad (19)$$

$$C_o(\xi, 0) = 1, \quad C_n(\xi, 0) = 1, \quad \bar{\rho}_1(\xi, 0) = 1, \quad \bar{\rho}_v^\infty(\xi, 0) = \bar{\rho}_{v,0}^\infty.$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} \theta_1(0, \tau) = 0, \quad \frac{\partial \theta_1(\infty, \tau)}{\partial \xi} = 0, \quad \frac{\partial C_o(0, \tau)}{\partial \xi} = \frac{\partial C_o(\infty, \tau)}{\partial \xi} = 0, \\ \frac{\partial C_n(0, \tau)}{\partial \xi} = \frac{\partial C_n(\infty, \tau)}{\partial \xi} = 0, \quad \frac{\partial \bar{\rho}_v^\infty(0, \tau)}{\partial \xi} = \frac{\partial \bar{\rho}_v^\infty(\infty, \tau)}{\partial \xi} = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

В безразмерной системе уравнений появились следующие безразмерные параметры: $B = \frac{4\pi r_{к,0}^3 N \rho_k c_k}{3c_1 \rho_*}$ —

массовая концентрация дисперсной фазы; $\chi = \frac{r_0^2 c_k \rho_k}{3t_* \lambda}$ — размер капель; $C = \frac{c_k}{c_1}$ — отношение удельных теплоем-

костей; $P = \frac{LR}{Ec_k \beta^2}$ — теплота испарения; $\beta = \frac{RT_*}{E}$ — энергия активации химической реакции; $\gamma = \frac{n_0 c_1 RT_*^2}{EQY_{o,0}}$ —

теплота химической реакции; $Le = \frac{Dc_1 \rho_*}{\lambda}$ — число Льюиса; $G = \frac{n_n Y_{o,0}}{n_o Y_{n,0}}$; $J = \frac{P_{atm}}{\rho_* RT_*} e^{(-\frac{L}{RT_*} + \frac{L}{RT_{кип}})}$;

$L_E = \frac{L}{E}$; $\omega = 2\alpha_w t_*/(r_T c_1 \rho_*)$ — теплообмен со стенками трубки.

Для решения системы уравнений (11)–(20) использовалась неявная разностная схема. После записи (11), (14)–(16) в разностной форме получившаяся система линейных уравнений решалась методом прогонки, а (12) и (13) — неявным методом Эйлера.

Тестирование разработанной программы было проведено на решении ряда модельных задач:

1. *Расчет задачи о сгорании газа в адиабатических условиях.* Из термодинамического соотношения при отсутствии капель воды

$$c_1 \rho_{1,0} T_0 + Q \rho_{1,0} Y_{n,0} = c_1 \rho_{1,0} T_{1,e}$$

получим выражение для конечной температуры продуктов сгорания

$$T_{1,e} = \frac{QY_{n,0}}{c_1} + T_0$$

или в безразмерной форме

$$\theta_{1,e} = \theta_{1,0} + 1/\gamma.$$

При $\gamma = 0.1$ и $\theta_{1,0} = -2$ расчет по формуле дает $\theta_{1,e} = 8$. Расчет по программе дал результат $\theta_{1,к} = 7.917$.

2. *Расчет задачи о выравнивании температуры горячих капель в холодном газе.* В системе уравнений (11)–(20) примем, что капли не испаряются, химической реакции нет. Расчет равновесной температуры из термодинамического соотношения $\theta_{1,e} = \frac{B\theta_{к,0} + \theta_{1,0}}{B + 1}$ дает значение $\theta_{1,e} = -7.69$. Расчет по программе при $\theta_{1,0} = -10$, $\theta_{к,0} = 0$, $B = 0.3$, $P = 1$ дает установившееся значение температуры, равное 7.68.

3. *Расчет скорости распространения пламени в чистом газе.* В системе уравнений (11)–(20) было принято $B = 0$ (капель нет), $\gamma = 0.1$ и $Le = 1$. Аппроксимационная формула [3] $U = 1.4\gamma^{3/2} Le^{-1/2}$ дает значение стационарной скорости пламени $U = 0.04427$, расчет по разработанной программе — 0.04209 (отличие составляет 5%).

Тестирование программы показало, что вычисленные по ней результаты соответствуют термодинамическим расчетам и совпадают с данными других авторов.

Нами было проведено исследование влияния параметров аэрозоля воды на скорость распространения пламени. Формально-кинетические параметры реакции в газе и теплофизические характеристики взяты соответствующими метановоздушной смеси [3] и воде. Расчеты проводились при следующих зна-

чениях теплофизических и макрокинетических характеристик: $\rho_k = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_l = 1.29 \text{ кг/м}^3$, $c_k = 4200 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, $c_l = 1000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, $r_0 = 0.1 \text{ мм}$, $\lambda = 0.0244 \text{ Дж/(м}\cdot\text{с}\cdot\text{К)}$, $L = 2.25 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$, $T_0 = 300 \text{ К}$, $T_{\text{кип}} = 373 \text{ К}$, $E = 238 \text{ 830 Дж/моль}$, $R = 8.31 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$, $P_{\text{atm}} = 10^5 \text{ Па}$, $Q = 49.8 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$, $k_0 = (9660 \cdot 5 \cdot 10^{10})/T_*$, $Y_{o,0} = 0.2$, $Y_{n,0} = 0.0325$. В результате безразмерные параметры задачи получили следующие значения: $Le = 1$, $G = 1.537$, $\beta = 0.073$, $\gamma = 0.085$, $L_E = 0.17$, $J = 3774.5$, $\chi = 8197$, $P = 3.5$, $C = 4.2$. Кроме того, в расчетах варьировались значения χ и B , характеризующие размер и массовую концентрацию капель воды, и $Y_{n,0}$, который через T_* определяет параметры γ , β , J , G , P , χ . Вычисления проводились для случаев отсутствия ($\omega = 0$) и наличия теплообмена со стенками трубки ($\omega \neq 0$).

Основная задача численного исследования — изучение влияния массовой концентрации капель в газе, их размера и внешнего теплоотвода на скорость распространения пламени.

Вначале рассматривалось горение газа в трубке с теплоизолированными стенками. После инициирования горения горячей стенкой волна горения выходит на стационарный режим распространения и встречает на своем пути запыленную каплями воды область. Тепло химической реакции идет на прогрев и испарение капель воды. Образующиеся пары воды разбавляют газовую смесь. После перестройки структуры волны горения при прохождении некоторого расстояния устанавливается стационарное значение скорости распространения, зависящее от параметров дисперсной фазы.

На рис. 1 и 2 представлена структура стационарного фронта пламени для двух значений параметра χ . При $\chi = 8197.1$ капли воды успевают испариться в зоне прогрева перед фронтом реакции. В случае $\chi = 1.5 \cdot 10^5$ капли испаряются медленно, и их исчезновение происходит далеко позади фронта реакции. При этом профиль температуры газа имеет небольшой максимум в зоне химической реакции (рис. 2, а).

В зависимости от массовой концентрации и размера капель воды стационарная скорость горения ведет себя по-разному (рис. 3). При $\chi = 4 \cdot 10^5$ с увеличением массовой концентрации скорость пламени падает незначительно в широком диапазоне изменения параметра B . Это обусловлено тем, что при больших значениях χ капли не успевают значительно повлиять на температуру фронта из-за небольшой площади контакта газ–жидкость, и температура в зоне реакции не отличается от адиабатической. В случае, когда в газе присутствуют капли малого размера, площадь контакта газ–жидкость большая (при одинаковых массовых концентрациях жидкости). Капля успевает за короткое время прогреться и испариться во фронте пламени, понизив при этом температуру в зоне реакции. С увеличением массовой концентрации скорость пламени уменьшается. В промежуточной области изменения размера капель зависимость скорости пламени от массовой концентрации имеет перегиб (рис. 3). При малых массовых концентрациях воды стационарная скорость пламени остается достаточно большой, и капли не

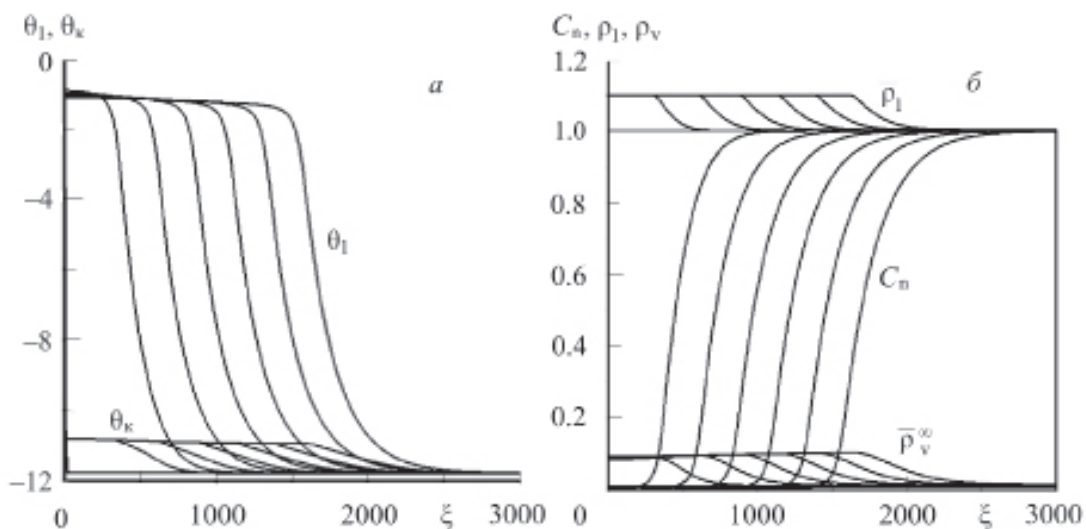


Рис. 1. Распределения температуры газа θ_1 и капель θ_k (а), концентрации горючего C_n , плотности паров воды $\bar{\rho}_v^\infty$ и газа $\bar{\rho}_1$ (б) по координате в последовательные моменты времени через $\Delta\tau = 6000$ при $\chi = 8197.1$, $B = 0.1$

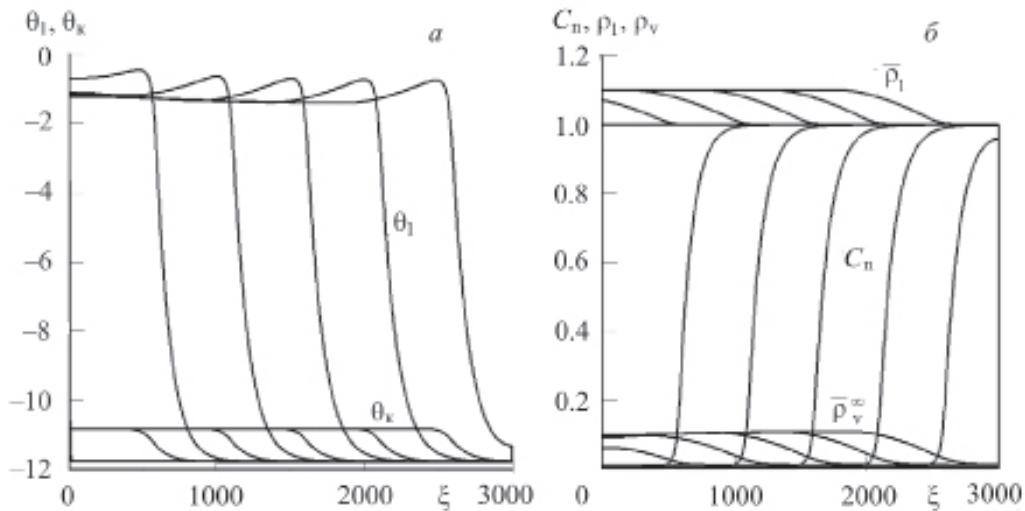


Рис. 2. Распределения температуры газа θ_1 и капель θ_k (а), концентрации горючего C_n , плотности паров воды $\bar{\rho}_v^\infty$ и горючего $\bar{\rho}_1$ (б) по координате в последовательные моменты времени через $\Delta t = 6000$ при $\chi = 150\ 000$, $B = 0.1$

успевают полностью испариться во фронте пламени, поэтому слабо влияют на скорость распространения пламени. В этой области изменения массовой концентрации B зависимость $U(B)$ имеет выпуклый характер (рис. 3, кривые 2, 3). С ростом B поверхность взаимодействия газ–жидкость увеличивается, расход тепла на прогрев и испарение капель из фронта горения повышается, скорость пламени уменьшается. В связи с этим время пребывания капель во фронте пламени увеличивается, и они успевают испариться в зоне прогрева и повлиять на скорость распространения пламени, понизив температуру в зоне химической реакции. В этой области изменения B зависимость $U(B)$ имеет вогнутый характер (рис. 3, кривые 2, 3).

В зависимостях стационарной скорости распространения пламени от χ при различных массовых концентрациях воды имеется область резкого изменения кривых $U(\chi)$ (рис. 4). Причем, чем больше массовая концентрация капель, тем более выражен этот "скачок". Видно, что при $\chi > 10^5$ капли слабо влияют на скорость пламени, и для получения эффекта торможения пламени в газе с заданными физико-химическими свойствами необходимо создание аэрозоля с размером капель воды, соответствующим $\chi < 10^5$.

С ростом теплоты химической реакции в газе (это соответствует уменьшению γ) стационарная скорость пламени увеличивается. При этих скоростях капли с размером, соответствующим $\chi = 10^5$, уже не успевают про-

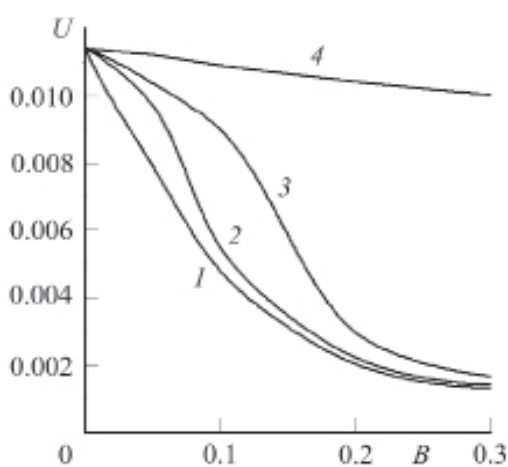


Рис. 3. Зависимость скорости горения газовой смеси U от параметра B : 1 — $\chi = 50\ 000$; 2 — $100\ 000$; 3 — $150\ 000$; 4 — $400\ 000$

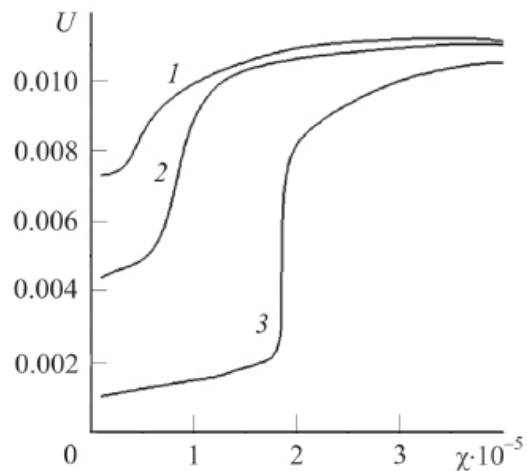


Рис. 4. Зависимости скорости горения топлива U от параметра χ : 1 — $B = 0.05$; 2 — 0.1 ; 3 — 0.2

греться и испариться во фронте реакции даже при больших массовых концентрациях жидкости, и перегиб зависимости $U(\chi)$ смещается в сторону меньших значений χ . Для значений $\gamma = 0.1$ $\beta = 0.087$ перегиб соответствует $\chi \approx 5 \cdot 10^4$.

Расчет размерной величины радиуса капель аэрозоля проведем из определения параметра $\chi = \frac{r_0^2 c_k \rho_k}{3t_* \lambda}$:

$$r_0 = \sqrt{\chi \frac{3t_* \lambda}{c_k \rho_k}}, \quad t_* = \frac{c_1 R T_*^2}{E Q \rho_* k_0 e^{-\frac{E}{RT_*}} Y_0 Y_{II}}$$

подставив в полученное выражение теплофизические и формально-кинетические характеристики метановоздушной смеси [3] и воды. Результаты представлены в таблице.

Из таблицы и рис. 3 видно, что размер капель, при которых водный аэрозоль влияет на скорость распространения пламени, должен быть менее 300 мкм. Этот результат соответствует требованиям к дисперсности водяных завес, применяемых для локализации пламени метановоздушной смеси при аварийной вспышке метана в выработках угольных шахт [1, 2].

Как показывают расчеты, при любых значениях параметров B и χ срыв горения не наблюдается. Это является следствием того, что тепло химической реакции остается в системе.

При наличии теплоотвода через боковые стенки трубки тепло химической реакции будет расходоваться не только на нагрев и испарение капель воды, но и отводиться в окружающую среду через стенки трубки. С увеличением ω скорость пламени вначале убывает почти линейно, а по достижении некоторого критического значения ω_* резко уменьшается, и дальнейший рост ω приводит к срыву горения. Расчеты проводились для размеров капель из области значений, когда капли интенсивно испаряются во фронте пламени ($\chi = 10^4$).

На рис. 5 (кривые 1, 2) представлены зависимости критической величины теплоотвода ω_* , приводящей к срыву горения, от массовой концентрации воды при двух значениях теплоты химической реакции (ω_* определены с точностью $\geq 95\%$). Видно, что с повышением B значения ω_* уменьшаются, а с увеличением теплоты химической реакции возрастают.

Наряду с жидкостями для огнепреграждения используются порошки различных модификаций. В связи с этим возникает вопрос, какой ингибитор предпочтительнее использовать и в какой области параметров, харак-

Расчетные данные размерной величины радиуса капель аэрозоля в зависимости от параметра χ

χ	$r_0, \text{ м}$
$2 \cdot 10^2$	$1.56 \cdot 10^{-5}$
$2 \cdot 10^3$	$4.94 \cdot 10^{-5}$
$2 \cdot 10^4$	$1.56 \cdot 10^{-4}$
$8 \cdot 10^4$	$3.12 \cdot 10^{-4}$
$2 \cdot 10^5$	$4.94 \cdot 10^{-4}$

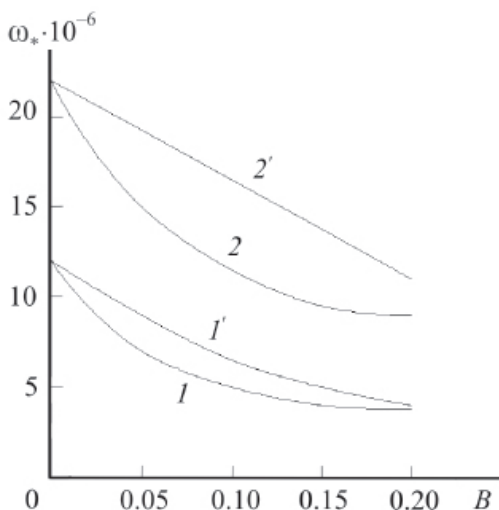


Рис. 5. Зависимость критического теплоотвода от массовой концентрации дисперсной фазы: 1, 2 — аэрозоль воды; 1', 2' — инертные частицы при $\chi = 10^4$, $C = 1.5$, $L_E = 0.1846$, $P = 5.65$; 1, 1' — $\gamma = 0.08$, $\beta = 0.069$; 2, 2' — $\gamma = 0.1$, $\beta = 0.087$

теризующих дисперсную фазу. В работах [4–8] исследован вопрос о распространении волны горения в запыленном инертными частицами газе, и выявлены зависимости скорости распространения пламени от параметров дисперсной фазы.

Система уравнений (1)–(10) при задании значений $L = 0$ и $\beta_m = 0$ описывает распространение пламени в горючем газе, запыленном инертными частицами. Сравнение тушащей способности аэрозоля и инертных порошков проводилось в предположении, что теплофизические характеристики частиц и капель, их начальные размеры и массовые концентрации одинаковы, но частицы не испаряются.

Расчеты показывают, что в присутствии крупных инертных частиц или капель жидкости скорость распространения пламени в этих средах одинакова и близка к стационарной скорости пламени в чистом газе. Это указывает на то, что относительно крупные капли жидкости, как и инертные частицы, медленно прогреваются в волне горения, не успевая значительно испариться. Поэтому они ведут себя как инертные частицы, и их воздействие на замедление фронта пламени одинаково. В случае мелкодисперсной жидкости замедление скорости распространения пламени больше, чем в присутствии инертных частиц того же размера. Это объясняется увеличением затрат тепла на испарение капель и связанным с этим уменьшением температуры в зоне реакции.

Критические значения внешнего теплоотвода из системы газ–частицы, приводящие к срыву горения, при малых χ значительно различаются. Величина ω_* для системы газ–частицы больше, чем для смеси газ–капли воды (рис. 5, кривые 1', 2'), а при увеличении χ они становятся почти одинаковыми со значениями ω_* для системы газ–капли воды.

Расчеты показывают, что использование воды для огнепреграждения эффективнее, чем использование инертной пыли, если размеры дисперсной фазы меньше $\chi = 10^4$. При увеличении размера частиц дисперсной фазы эффективность воздействия на пламя аэрозоля воды или взвеси инертных частиц становится одинаковой.

Выводы

1. Сформулирована физико-математическая модель распространения пламени в газе, содержащем аэрозоль воды, основанная на тепло-диффузионной модели распространения ламинарного пламени в газе и учитывающая процессы тепло- и массообмена между газовой фазой и каплями жидкости.

2. На основе численного решения системы уравнений математической модели определена структура волны горения в газе, содержащем аэрозоль воды. Проведено параметрическое исследование влияния характеристик аэрозоля на скорость распространения пламени в газе, содержащем аэрозоль воды, и определена область параметров аэрозоля, при которых присутствие аэрозоля приводит к уменьшению скорости пламени. Также определены критические условия срыва горения при теплоотводе из фронта горения.

3. Проведено сравнение полученных расчетным путем характеристик аэрозоля (размера капель и массовой концентрации аэрозоля), эффективно влияющих на торможение пламени, с техническими требованиями, предъявляемыми при практическом использовании водяных завес к дисперсности и массовой концентрации аэрозоля воды. Получено хорошее количественное соответствие этих характеристик.

4. Сравнение эффективности использования аэрозоля воды и инертной пыли для огнепреграждения показало, что существует граничный размер дисперсной фазы, выше которого эффективность использования аэрозоля воды и инертных порошков для огнепреграждения становится одинаковой.

Обозначения

$C_o = \frac{\rho_o}{\rho_{o,0}}$ — концентрация окислителя; $C_n = \frac{\rho_n}{\rho_{n,0}}$ — концентрация горючего; c_1 — удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·К); c_k — удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К); D — коэффициент диффузии, м²/с; E — энергия активации, Дж/моль; $\theta_1 = \frac{E}{RT_*^2} (T_1 - T_*)$, $\theta_k = \frac{E}{RT_*^2} (T_k - T_*)$ — безразмерные температуры газа и капель; k_0 — предэкспоненциальный множитель, м³/(кг·с); R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); r_k — радиус капли воды, м; $\bar{r}_k = \frac{r_k}{r_{k,0}}$ — безразмерный радиус капли; r_T — характерный размер трубки, м; L — удельная теплота испарения воды, Дж/кг; N — количество капель жидкости в единице объема, 1/м³; n_o , n_n — массовые стехиометрические коэффициенты; P_{atm} — нормальное атмосферное давление, Па; Q — тепловой эффект реакции, Дж/кг; T_k — температура капли, К; T_1 — температура газа, К; T_w — температура стенок трубки, К; t — время, с; x — координата, м; $\alpha = Nu\lambda/r_k$ — коэффициент теплообмена между газом и каплями, Дж/(м²·с·К); α_w — коэффициент теплообмена газа со стенками трубки, Дж/(м²·с·К); $\beta_m = Nu_D D/r_k$ — коэффициент массоотдачи, м/с; λ — коэффициент теплопроводности, Дж/(м·с·К); ρ_1 — плотность газа, кг/м³; ρ_k — плотность

воды, кг/м^3 ; $\rho_o, \rho_n, \rho_{in}$ — парциальные плотности окислителя, горючего, инертного газа (азота воздуха и продуктов реакции), кг/м^3 ; ρ_v^∞, ρ_v^n — парциальные плотности паров вдали от капли и на ее поверхности, кг/м^3 ; $\bar{\rho}_l = \frac{\rho_l}{\rho_*}$ — безразмерная плотность газа; $\bar{\rho}_v^\infty = \frac{\rho_v^\infty}{\rho_*}$ — безразмерная парциальная плотность паров воды; $\tau = \frac{t}{t_*}$ — безразмерное время; $\xi = \frac{x}{x_*}$ —

безразмерная пространственная координата. Индексы: а — адиабатический; к — капля; кип — кипение; п — поверхность; т — трубка; е — конечный (end); m — массоотдача; n — горючее (природный газ, nature); o — окислитель (oxidizer); v — пар (vapour); w — стенка (wall).

Литература

1. Петрухин П. М., Нецепляев М. И., Качан В. Н., Сергеев В. С. *Предупреждение взрывов пыли в угольных шахтах*. Москва: Недра, 1974.
2. Нецепляев М. И., Любимова А. И., Петрухин П. М., Плоскоголовый Е. П., Сургай Н. С. *Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах*. Москва: Недра, 1992.
3. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. *Математическая теория горения и взрыва*. Москва: Наука, 1980.
4. Губин Е. И., Дик И. Г. Распространение пламени в запыленном газе. *Физика горения и взрыва*. 1987. Т. 23, № 6. С. 25–29.
5. Дик И. Г., Губин Е. И., Крайнов А. Ю. Нестационарное взаимодействие волны горения с пылевым облаком. *Инженерно-физический журнал*. 1988. Т. 55, № 2. С. 236–243.
6. Крайнов А. Ю., Шаурман В. А. О пределах распространения пламени по запыленному газу. *Физика горения и взрыва*. 1997. Т. 33, № 4. С. 14–20.
7. Губин Е. И., Дик И. Г., Крайнов А. Ю. Ингибирование газовых пламен порошковыми составами. *Физика горения и взрыва*. 1989. Т. 25, № 2. С. 57–62.
8. Крайнов А. Ю. Распространение пламени в смеси горючих газов и частиц. *Физика горения и взрыва*. 2000. Т. 36, № 2. С. 3–9.
9. Крайнов А. Ю., Шаурман В. А. Ингибирование газовых пламен аэрозолью капельной жидкости. *Физика горения и взрыва*. 1996. Т. 32, № 4. С. 55–61.