

УДК 628.511.133

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА УСТАНОВКИ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В. В. Вамболь

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»
ул. Чкалова, 17, г. Харьков, 61070, Украина. E-mail: violavambol@gmail.com

Определена математическая модель газовой фазы оросительного охлаждения генераторного газа, полученного в термохимической пиролизной печи с плазменным дожиганием. Интенсивное охлаждение впрыском воды обеспечивает резкое понижение температуры газа, что позволяет предотвратить рекомбинацию диоксинов. Для диспергирования жидкости применены центробежные форсунки, встроенные в газоотводящую трубу. При математическом моделировании использован классический подход описания процессов течения и тепломассообмена двухфазной многокомпонентной среды с фазовым превращением (испарением) в газоотводящей трубе. Математическое описание процесса охлаждения генераторного газа с помощью жидкости, диспергируемой центробежными форсунками, позволит в дальнейшем проводить численные исследования процессов, предотвращающих образование высокотоксичных веществ.

Ключевые слова: экологическая безопасность, утилизация отходов, плазменная газификация, математическое моделирование, оросительное охлаждение, газовая фаза.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОВОЇ ФАЗИ ОХОЛОДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗУ УСТАНОВКИ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

В. В. Вамболь

Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ»
вул. Чкалова, 17, м. Харків, 61070, Україна. E-mail: violavambol@gmail.com

Визначена математична модель газової фази зрошувального охолодження генераторного газу, отриманого в термохімічній піролізній печі з плазмовим допалюванням. Інтенсивне охолодження уприскуванням води забезпечує різке зниження температури газу, що дозволяє запобігти рекомбінації діоксинів. Для диспергування рідини застосовані відцентрові форсунки, які вбудовані у газовідвідну трубу. При математичному моделюванні використано класичний підхід опису процесів течії і тепломасообміну двофазного багатокомпонентного середовища з фазовим перетворенням (випаровуванням) у газовідвідній трубі. Математичний опис процесу охолодження генераторного газу за допомогою рідини, яка диспергована відцентровими форсунками, дозволить надалі проводити чисельні дослідження процесів, що запобігають утворенню високотоксичних речовин.

Ключові слова: екологічна безпека, утилізація відходів, плазмова газифікація, математичне моделювання, зрошувальне охолодження, газова фаза.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Утилизация отходов жизнеобеспечения методом плазменной газификации позволяет снижать экологическую нагрузку. Для утилизации твердых бытовых и производственных отходов необходимы затраты, сопоставимые со стоимостью производства первичной продукции. Снизить эти затраты позволяет реализация системы управления экологической безопасностью, в основу которой положен способ смешанной газификации отходов. Этот способ дает возможность не только утилизировать отходы, но и получать продукты для поддержания реакции газификации и пригодные для реализации [1, 2]. В качестве побочного продукта возможно получение газообразного топлива (метана).

Экологически эффективным этот процесс может быть в случае предотвращения образования высокотоксичных веществ (таких как диоксины и фураны) на этапе обработки отходов в термохимической пиролизной печи и на выходе из печи при охлаждении генераторного газа.

Наиболее активное образование диоксинов происходит приблизительно в диапазоне температур от 350 до 850 °С. В печи применяется процесс послеевого пиролиза отходов в условиях недостатка кислорода, что приводит, к разложению сложных и тяжелых органических молекул на более простые фрагменты, а последующая обработка дымовых газов плазменной струей позволяет предотвратить образование крупных молекул токсичных соединений посредством разбиения их на отдельные атомы и молекулы. При температуре плазменной струи полностью разрушаются любые органические и биологические материалы, гарантировано уничтожаются самые токсичные материалы.

Быстро преодолеть диапазон опасных температур при выходе газового потока из печи позволяет резкое охлаждение горячих дымовых газов путем впрыска воды в газовый поток.

Опыт проектирования оросительных систем охлаждения показывает необходимость углубленного

исследования процессов течения и тепломассообмена двухфазной многокомпонентной среды с фазовым превращением (испарением) с целью организации необходимой пространственной структуры водного аэрозоля и выработки на этой основе эффективных конструктивных решений. В условиях снижения затрат на исследование и разработку перспективных технологий численный эксперимент становится одним из наиболее экономичных и удобных способов детального анализа сложных процессов в газодисперсных средах.

Цель работы – создание математической модели газовой фазы охлаждения генераторного газа установки утилизации отходов жизнедеятельности.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

После дожигания в плазменном газогенераторе температура газа более 1000 °С, поэтому в установке необходимо предусматривать быстрое охлаждение генераторного газа, которое обеспечивается с помощью впрыска воды в поток газа, выходящего из газогенератора. На входе в газоотводящую трубу (рис. 1) установлены три центробежные форсунки для распыливания воды.

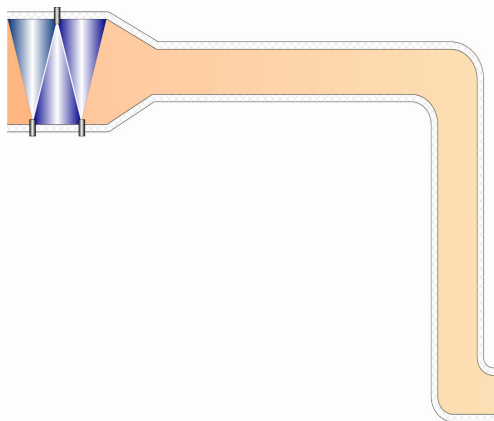


Рисунок 1 – Газоотводящая труба

Одна форсунка расположена с одной стороны газоотводящей трубы (рис. 2) и две форсунки на противоположной плоскости (рис. 3).

Форсунки размещены со смещением в плоскости с тем, чтобы обеспечить полное перекрытие площади сечения канала. Газ, проходящий через распыленную воду, нагревает ее и отводит тепло за счет теплоты испарения.

Схематично расположение форсунок и создаваемые ими факела (конусы) распыла, показаны на рис. 4.



Рисунок 2 – Система оросительного охлаждения генераторного газа, вид справа: красным цветом обведен исследуемый участок газоотводящей трубы; зеленым – место установки форсунки

Объектом исследования являются процессы оросительного охлаждения генераторного газа впрыском воды.

Предмет исследования – зависимость эффективности системы оросительного охлаждения генераторного газа впрыском воды, диспергированной центробежными форсунками.

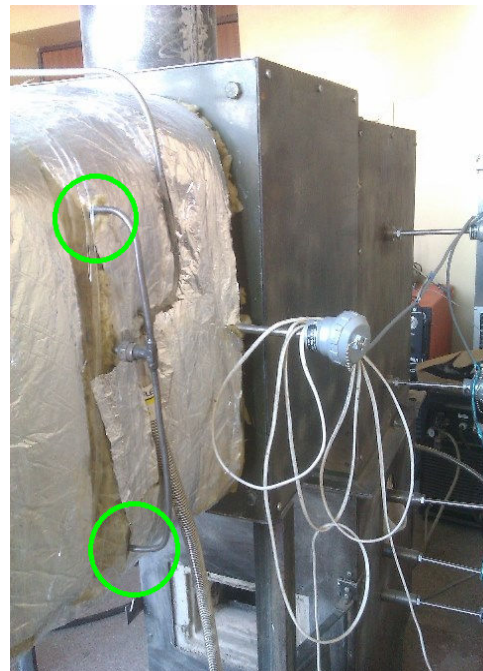


Рисунок 3 – Система оросительного охлаждения генераторного газа: зеленым обозначен подвод воды к форсункам

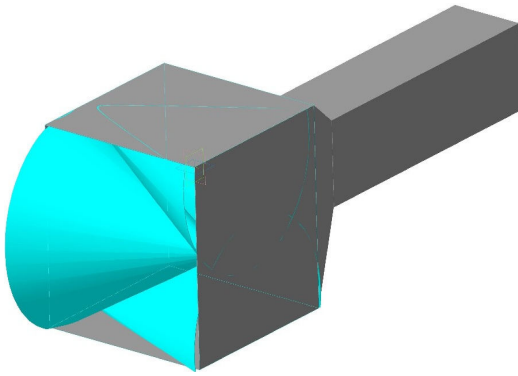


Рисунок 4 – Схема создания водяной завесы в газоотводящей трубе

Для математического моделирования использован классический подход описания процессов течения и теплообмена двухфазной многокомпонентной среды с фазовым превращением (испарением) в газоотводящей трубе.

Похожий подход на основе непосредственного применения законов сохранения массы и количества движения к неоднородной по компонентному и фазовому составу среде был использован при моделировании газовой фазы процесса постановки водяных завес в работе [3]. Математической формой записи законов сохранения для вязкого газа (пара) являются уравнения Навье–Стокса.

При математическом описании газодисперсной среды были приняты следующие основные допущения:

- течение газовой фазы несжимаемое, турбулентное;
- турбулентность изотропная.

С учетом ряда введенных допущений квазистационарное дозвуковое течение газовой фазы может быть описано системой осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса [4], включающей уравнение неразрывности, уравнения сохранения импульса, энергии, два уравнения дифференциальной модели турбулентности k – ε типа [5] и уравнения сохранения массовых долей химических компонентов, которая замыкается уравнением состояния смеси идеальных газов:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = S_m, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \rho \vec{g} = S_{fi}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial u_j h}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_\delta}{Pr_\delta} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} = S_q, \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_\delta}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} - \rho(G - \varepsilon) = 0, \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial u_j \varepsilon}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_\delta}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} - \rho(C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} = 0, \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial u_j Y_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_\delta}{Sc_\delta} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} = S_i, \quad (6)$$

$$p = R\rho T \sum_i \frac{Y_i}{M_i}, \quad (7)$$

где u_j – компоненты вектора осредненной скорости смеси; x_j – декартовы координаты; ρ – плотность смеси; p – давление смеси; τ_{ij} – компоненты тензора напряжений, которые определяются выражением

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_\delta) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

где μ – динамическая вязкость смеси; $\mu_\delta = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$ – турбулентная вязкость смеси; k , ε – удельные кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации соответственно; h – удельная энтальпия смеси.

$$h = \sum_i Y_i \left(\Delta h_{fi}^0 + \int_{T^0}^T c_{pi}(T) dT \right),$$

где Y_i – массовая доля химического компонента i ; Δh_{fi}^0 – удельная энтальпия образования химического компонента i ; T – температура смеси; T^0 – стандартная температура; c_{pi} – удельная теплоемкость химического компонента i при постоянном давлении; Pr – число Прандтля; Pr_m – турбулентное число Прандтля; G – член, который характеризует генерацию кинетической энергии турбулентности за счет сдвиговых напряжений

$$G = \mu_\delta \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

где Sc – число Шмидта; Sc_T – турбулентное число Шмидта; R – универсальная газовая постоянная; M_i – молекулярная масса химического компонента i ; S_m , S_{fi} , S_q , S_i – соответственно источники мас-

сы, импульса, теплоты и концентрации химических компонентов, которые обусловлены межфазным взаимодействием.

Граничные условия. Система дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП) (1)–(6) дополняется соответствующими граничными условиями для независимых переменных.

На границах расчетной области задавались следующие граничные условия непрерывной фазы: на входе в газоотводящую трубу – массовый расход генераторного газа ($G_r = 60$ кг/ч), температура генераторного газа ($t_r = 1200$ °С) и интенсивность турбулентности ($I_r = 10$ %), на выходе из газоотводящей трубы – нулевое избыточное статическое давление парогазовой смеси, на стенках – условие прилипания, аппроксимируемое эмпирической пристеночной функцией.

Непосредственное применение условия прилипания требует модификации модели турбулентности в пристеночной области, где турбулентная вязкость близка к молекулярной, и значительного измельчения расчетной сетки вблизи стенки. Опыт численного моделирования трехмерных течений показывает, что сложность геометрической формы расчетной области, часто приводит к тому, что именно потребная размерность расчетной сетки становится тем критическим параметром, который определяет возможность проведения вычислительного эксперимента на располагаемой технической базе. Поэтому вместо условия прилипания для описания турбулентного пограничного слоя используются функции стенки – набор полуэмпирических функций, связывающих значения независимых переменных в центре пристеночной расчетной ячейки (точке Р) со значениями соответствующих переменных на стенке и базирующихся на предположении Лаундера и Сполдинга [6].

Закон стенки для осредненной скорости имеет вид

$$U^* = \begin{cases} y^* & \text{їđđ } y^* \leq 11,225 \\ \frac{1}{K} \ln(Ey^*) & \text{їđđ } y^* > 11,225 \end{cases}, \quad (8)$$

где K – постоянная Кармана; E – эмпирическая постоянная.

Безразмерные параметры U^* и y^* определяются выражениями

$$U^* = \frac{U_P C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}}{\tau_w / \rho}; \quad y^* = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P}{\mu}, \quad (9)$$

где U_P – осредненная скорость газа в точке Р; k_P – кинетическая энергия турбулентности в точке Р; τ_w – напряжение трения на стенке; ρ – плотность

газа; y_P – расстояние точки Р от стенки; μ_x – динамическая вязкость.

Уравнение (4) переноса кинетической энергии турбулентности k решается во всей расчетной области, включая пристеночные ячейки. Граничное условие для k , задаваемое на стенке, имеет вид

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0, \quad \text{где } n \text{ – локальная координата, нормальная к стенке.}$$

Генерация кинетической энергии турбулентности G и скорость ее диссипации ϵ , которые входят в источникный член уравнения (4), в пристеночных ячейках рассчитываются на основе гипотезы о локальном равновесии. При этом допущении генерация кинетической энергии турбулентности и скорость ее диссипации в пристеночном контрольном объеме полагаются одинаковыми. В результате уравнение (5) для ϵ в пристеночных ячейках не решается, вместо этого она определяется по формуле

$$\epsilon_P = \frac{C_\mu^{3/4} k_P^{3/2}}{K y_P}, \quad (10)$$

где k – эмпирическая постоянная.

В общем случае в рабочей зоне движется двухфазный поток, содержащий генераторный газ и полидисперсный водный аэрозоль.

Данная математическая модель описывает только газовую фазу. Она необходима в дальнейшем для оценки межфазного взаимодействия диспергированной жидкости и газового потока в газоотводящем канале.

Поскольку газовая фаза оказывает воздействие на дисперсную фазу, то следует учитывать и обратное влияние дисперсной фазы на континуум. Это двухстороннее взаимодействие учитывается поочередным решением уравнений дисперсной и непрерывной фаз до тех пор, пока решения обеих фаз не установятся.

Таким образом, для создания эффективной оросительной системы охлаждения дымовых газов, образованных при утилизации отходов требуется учет движения дисперсной фазы и межфазного взаимодействия.

ВЫВОДЫ. Обеспечение экологической безопасности при утилизации отходов возможно при снижении вероятности образования высокотоксичных веществ. Это достигается резким охлаждением генераторного газа до безопасной температуры. На основе универсального классического подхода разработана математическая модель охлаждения генераторного газа с помощью впрыскиваемой жидкости, диспергируемой центробежными форсунками, которая позволит в дальнейшем проводить численные исследования процессов, предотвращающих образование высокотоксичных веществ. Получены

соотношения, которые описывают особенности трехмерных течений при охлаждении генераторного оросительной системой в газоотводной трубе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтернативная технология утилизации отходов жизнедеятельности / Н.В. Нечипорук, В.Ш. Эрсамбетов // *Екологічна безпека: науковий журнал*. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 2/2012 (14). – С. 80–84.

2. Система управления экологической безопасностью при утилизации твердых бытовых и производственных отходов / В.Н. Кобрин, Н.В. Нечипорук, В.В. Вамболь // *Екологічна безпека: науковий журнал*. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 2/2014 (18). – С. 24–29.

3. Вамболь С.А. Моделирование газовой фазы процесса установки дисперсных водных завес в системах управления экологической безопасности // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. – Вип. 6/2012 (77). – Кременчук: КрНУ, 2012. – С. 91–93.

4. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. – М.: Наука, 1978. – 736 с.

5. Launder B.E., Spalding D.B. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, England, 1972.

6. The Numerical Computation of Turbulent Flows / B.E. Launder, D.B. Spalding // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 1974. – No. 3. – PP. 269–289.

MATHEMATICAL MODELING OF GAS PHASE COOLING GENERATOR GAS PLANTS FOR UTILIZATION OF WASTE PRODUCTS

V. Vambol

National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute»

vul. Chkalova, 17, Kharkiv, 61070, Ukraine. E-mail: violavambol@gmail.com

Determined a mathematical model of the gas phase spray cooling of the product gas obtained in thermochemical pyrolysis furnace Plasma afterburning. Intensive cooling by water injection provides a sharp drop in gas temperature that prevents recombination of dioxins. For liquid dispersion used centrifugal atomizer built into the flue pipe. In mathematical modeling used classical approach describing the processes of flow and heat and mass transfer of two-phase multi-component media with phase change (evaporation) in the flue pipe. The mathematical description of the cooling process of generating gas using liquid dispersible centrifugal nozzle, will further carry out the numerical study of the processes that prevent the formation of highly toxic substances.

Key words: ecological safety, recycle of waste, plasma gasification, mathematical modeling, spray cooling, gas phase.

REFERENCES

1. Nechiporuk, N.V., Ersmambetov, V.Sh. (2012) “Alternative technology-waste disposal”, *Scientific Journal «Ecological Safety»*, iss. 2 (14), pp. 80–84.

2. Kobrin, V.N., Nechiporuk, N.V., Vambol, V.V. (2014) “Control system of environmental safety during disposal of solid household and industrial waste”, *Scientific Journal «Ecological Safety»*, iss. 2 (18), pp. 24–29.

3. Vambol, S.A. (2012) “Modeling of the gas phase of the installation process disperse water curtains in the control systems of environmental safety”, *Transaction of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, iss. 6 (77), pp. 91–93.

4. Loytcyansky, L.G. (1978) *Meckanika zhidkosti a gaza* [Fluid Mechanics], Nauka, Moscow, Russia.

5. Launder, B.E., Spalding, D.B. (1972) [Lectures in Mathematical Models of Turbulence], Academic Press, London, England.

6. Launder, B.E., Spalding, D.B. (1974) “The Numerical Computation of Turbulent Flows”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, no. 3, pp. 269–289.

Стаття надійшла 01.12.2014.