

**В.В. Вамболь**

(Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского  
"Харьковский авиационный институт"; e-mail: violavambol@gmail.com)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА В УСТАНОВКЕ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ**

*Исследованы процессы образования диоксинов, приведено математическое описание газодинамических процессов, предотвращающих их образование при охлаждении генераторного газа.*

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

**V.V. Vambol**

## **MODELLING GAS DYNAMIC COOLING PROCESSES OF GENERATING GAS IN PLANTS FOR WASTE DISPOSAL**

*Investigated processes of formation of dioxins, is given mathematical description of dynamic processes, prevent their formation at cooling gas generator.*

*Key words: environmental safety, recycling, plasma gasification, mathematical modeling, spray cooling, the gas phase.*

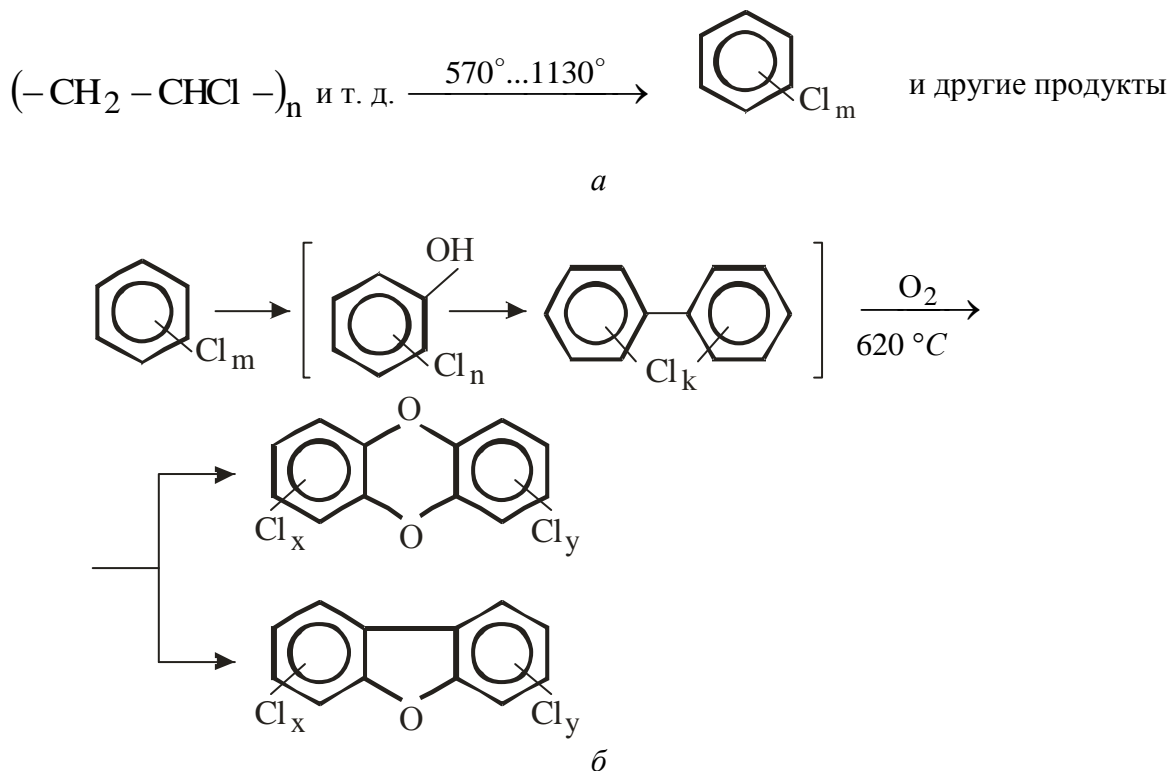
Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 10 декабря 2014 г.

Основной проблемой при термической обработке отходов является обеспечение безопасности от возникновения диоксинов – кумулятивных ядов, относящихся к группе опасных ксенобиотиков. По уровню токсичности эти вещества превосходят все известные токсины. Они не разлагаются в окружающей среде десятки лет, накапливаются в верхнем слое почвы и попадают в организм человека в основном с пищей, водой и воздухом [1].

Известны механизмы образования диоксинов при термической переработке отходов [2]. Один состоит в неполном разложении диоксинов, которые образовались ранее и содержатся в окружающей среде; они поступают вместе с отходами, но из-за неполного разрушения при термической переработке снова попадают в атмосферу. Другой – это образование диоксинов в газовой фазе в пламени из углеводородов и хлоридов, таких как фенол и HCl. Известен подобный этому механизм, когда образование диоксинов происходит на частично сгоревшем твердом топливе в зоне горения. Названным выше "высокотемпературным" механизмам формирования диоксинов противодействуют механизмы разрушения, поскольку диоксины нестабильны при температурах выше 800...850 °С. Существует также механизм повторного формирования диоксинов, или "de novo", который наблюдается в дымовых газах на частицах летучей золы в диапазоне температур 300...450 °С. При такой температуре, когда конкурирующие процессы разрушения диоксинов протекают очень медленно,

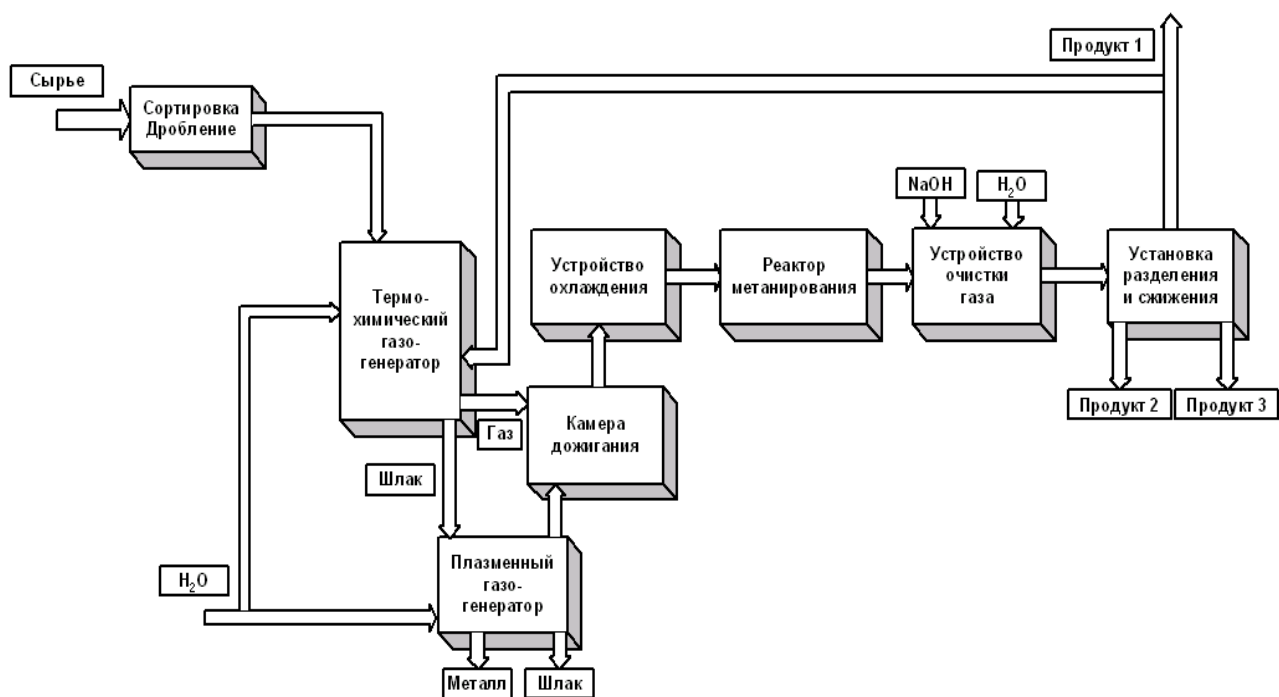
может происходить каталитическое формирование диоксинов. К факторам их формирования относятся скорость охлаждения газов в диапазоне температур 300...400 °С и присутствие кислорода.

Максимум формирования диоксинов по "de novo" приходится на 400 °С. Большие количества диоксинов образуются при сжигании полимерных отходов, содержащих галогены. Механизм их образования можно представить как двухстадийный процесс (рис. 1) [3].



**Рис. 1.** Процесс образования диоксинов при утилизации отходов:  
*a* – первая стадия; *b* – вторая стадия

Утилизация отходов жизнеобеспечения методом плазменной газификации позволяет снизить экологическую нагрузку. Для утилизации твердых бытовых и производственных отходов необходимы затраты, сопоставимые со стоимостью производства первичной продукции. Такая технология должна включать в себя процессы термохимической газификации, плазменной обработки газов, резкое охлаждение, предварительную очистку, метанирование, окончательную очистку газов и низкотемпературное разделение синтез-газа на топливные продукты (рис. 2). Этот способ дает возможность не только утилизировать отходы, но и получать продукты для поддержания реакции газификации и продукты, пригодные для дальнейшего использования [4, 5]. В качестве побочного продукта возможно получение газообразного топлива (метана).



**Рис. 2.** Последовательность технологических этапов утилизации отходов

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

В печи происходит процесс послойного 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 вещества. Температура газа на выходе из печи после дожигания – примерно 1200 °С. Наиболее активное образование диоксинов происходит при охлаждении этого газа.

Таким образом, необходимо резко охладить газ до безопасной температуры 300 °С. Для этого в блоке охлаждения предлагается оросительная система с применением центробежных форсунок путем впрыскивания диспергированной жидкости.

Математическое описание процесса охлаждения генераторного газа с помощью впрыскиваемой жидкости, диспергируемой центробежными форсунками, позволит в дальнейшем проводить численные исследования процессов, предотвращающих образование высокотоксичных веществ.

### **Постановка задачи исследования**

Опыт проектирования оросительных систем охлаждения свидетельствует о необходимости углубленного исследования процессов течения и теплообмена двухфазной многокомпонентной среды с фазовым превращением (испарением) в целях 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.

Объектом исследования являются процессы оросительного охлаждения генераторного газа впрыском воды.

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

### **Материалы и результаты исследований**

На входе в газоотводящую трубу (рис. 3) установлены три центробежные форсунки для распыливания воды.

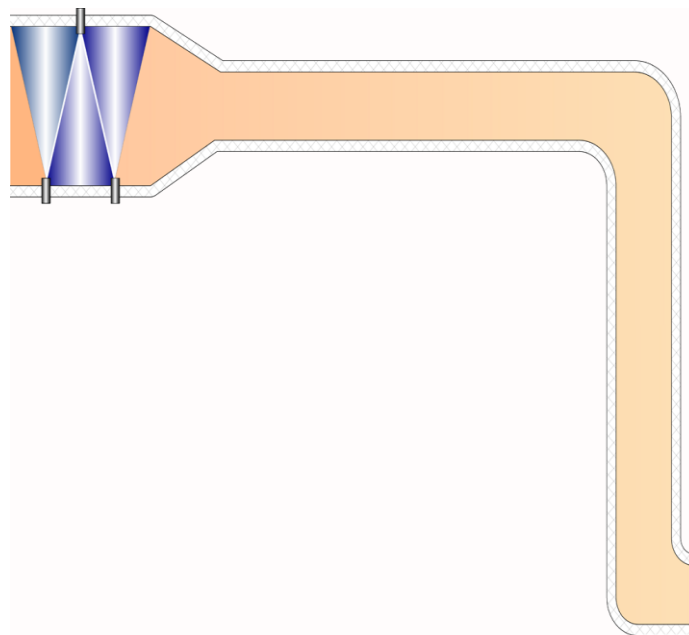
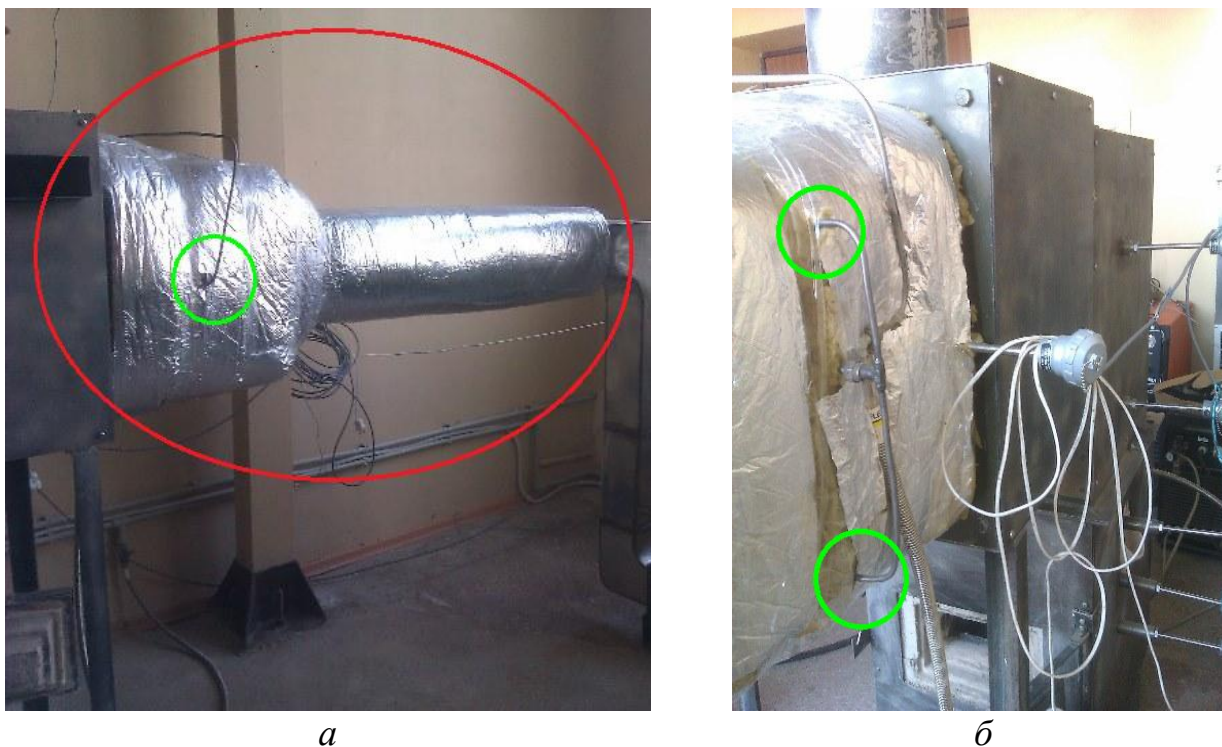


Рис. 3. Схема газоотводящей трубы

Одна форсунка расположена с одной стороны газоотводящей трубы (рис. 4, *а*) и две форсунки – на противоположной плоскости (рис. 4, *б*). Форсунки размещены со смещением в плоскости с тем, чтобы обеспечить полное перекрытие площади сечения канала. Газ, проходящий через распылённую воду, нагревает её и отводит тепло за счёт теплоты испарения.



**Рис. 4.** Система оросительного охлаждения генераторного газа:  
*а* – вид спереди; *б* – вид сзади; большая окружность – исследуемый участок газоотводящей трубы; малая окружность – место установки форсунок

Для математического моделирования использован классический подход описания процессов течения и тепломассообмена 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 [6]. 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 учётом ряда введённых допущений квазистационарное существенно дозвуковое течение газовой фазы может быть описано системой осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса [7], включающей в себя уравнение неразрывности, уравнения сохранения импульса, энергии, два уравнения дифференциальной модели турбулентности  $k$ - $\varepsilon$ -типа [8], уравнение сохранения массовых долей химических компонентов и уравнение состояния смеси идеальных газов:

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

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

$$\rho \frac{\partial u_j h}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} = S_q; \quad (3)$$

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

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

$$\rho \frac{\partial u_j Y_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_T}{Sc_T} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} = S_i; \quad (6)$$

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

где  $u_j$  – компоненты вектора осреднённой скорости смеси;

$x_j$  – декартовы координаты;

$\rho$  – плотность смеси;

$p$  – давление смеси;

$\tau_{ij}$  – компоненты тензора напряжений,

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_m) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right);$$

$\mu$  – динамическая вязкость смеси;

$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$  – турбулентная вязкость смеси;

$k, \varepsilon$  – удельные кинетическая энергия турбулентности и скорость её диссипации соответственно;

$h$  – удельная энтальпия смеси,

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



$Y_i$  – массовая доля химического компонента  $i$ ;

$\Delta h_{fi}^0$  – удельная энтальпия образования химического компонента  $i$ ;

$T$  – температура смеси;

$T^0$  – стандартная температура;

$c_{pi}$  – удельная теплоёмкость химического компонента  $i$  при постоянном давлении;

$Pr$  – число Прандтля;

$Pr_t$  – турбулентное число Прандтля;

$G$  – член, который характеризует генерацию кинетической энергии турбулентности за счёт сдвиговых напряжений,

$$G = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right);$$

$Sc$  – 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 массы, импульса, теплоты и концентрации химических компонентов, которые обусловлены межфазным взаимодействием.

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

На границах расчётной области задавались следующие граничные условия непрерывной фазы: на входе в газоотводящую трубу – массовый расход генераторного газа ( $G_r = 60 \text{ кг/ч}$ ), температура генераторного газа ( $t_r = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и интенсивность турбулентности ( $I_t = 10 \%$ ), 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 расчётной сетки вблизи стенки. Опыт численного моделирования трехмерных течений показывает, что сложность геометрической формы расчётной области часто приводит к тому, что именно потребная размерность расчётной 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 расчётной ячейки (точке  $P$ ) со значениями соответствующих переменных на стенке и базирующихся на предположении Лаундера и Сполдинга [9]. Закон стенки для осредненной скорости имеет вид

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

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  $U_P$  – осреднённая скорость газа в точке  $P$ ;

$k_P$  – кинетическая энергия турбулентности в точке  $P$ ;

$\tau_w$  – напряжение трения на стенке;

$\rho$  – плотность газа;

$y_P$  – расстояние от точки  $P$  до стенки;

$\mu_x$  – динамическая вязкость.

Уравнение (4) переноса кинетической энергии турбулентности  $k$  решается во всей расчётной области, включая пристеночные ячейки. Граничное условие для  $k$ , задаваемое на стенке, имеет вид  $\frac{\partial k}{\partial n} = 0$ , где  $n$  – локальная координата, нормальная к стенке.

Генерация кинетической энергии турбулентности  $G$  и скорость её диссипации  $\varepsilon$ , которые входят в источниковый член уравнения (4), в пристеночных ячейках рассчитываются на основе гипотезы о локальном равновесии. При этом допущении генерация кинетической энергии турбулентности и скорость её диссипации в пристеночном контрольном объёме полагаются одинаковыми. В результате уравнение (5) для  $\varepsilon$  в пристеночных ячейках не решается, вместо этого определяется

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

где  $\kappa$  – 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, 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 учёт движения дисперсной фазы и межфазного взаимодействия.

### Выводы

Обеспечение экологической безопасности при утилизации отходов возможно путем снижения вероятности возникновения 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. Получены соотношения, которые описывают особенности трехмерных течений при охлаждении генераторного газа оросительной системой в газоотводящей трубе.

### Литература

1. **Федоров Л.А.** Диоксины как экологическая опасность: ретроспектива и перспективы // Распад и образование диоксина при горении отходов. М.: Наука, 1994. Т. 13. № 2. С. 17-33.
2. **Сленкин М.В., Жовмир Н.М., Дрозд К.А.** Образование диоксинов при термической утилизации твёрдых бытовых отходов. <http://waste.ua/cooperation/2005/theses/slenkin.html>.
3. Милош В.В. Диоксины и их потенциальная опасность в экосистеме "человек – окружающая среда". <http://crowningold.narod.ru/articles/dioxini.htm>.
4. **Нечипорук Н.В., Эрсамбетов В.Ш.** Альтернативная технология утилизации отходов жизнедеятельности // Екологічна безпека. Кременчук: КрНУ, 2012. Вып. 2/2012 (14). С. 80-84.
5. **Кобрин В.Н., Нечипорук Н.В., Вамболь В.В.** Система управления экологической безопасностью при утилизации твердых бытовых и производственных отходов // Екологічна безпека. Кременчук: КрНУ, 2012. Вып. 2/2014 (18). С. 24-29.
6. **Вамболь С.А.** Моделирование газовой фазы процесса установки дисперсных водных завес в системах управления экологической безопасности // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського: зб. наук. праць. Кременчук: КрНУ, 2012. № 6/2012 (77). С. 91-93.
7. **Лойцянский Л.Г.** Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. 736 с.
8. **Lauder B.E., Spalding D.B.** Lectures in Mathematical Models of Turbulence. London: Academic Press, 1972.
9. **Lauder B.E., Spalding D.B.** The Numerical Computation of Turbulent Flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1974. No. 3. P. 269-289.