

**Вамболь В. В.,  
Костюк В. Е.,  
Кирилаш Е. И.**

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

*Представлено математическое описание процесса охлаждения генераторного газа при утилизации отходов. На основе классической теории газодинамики получены математические соотношения, описывающие газовую и дисперсную фазы. Исследовано межфазное взаимодействие и его влияние на эффективность предлагаемой системы охлаждения генераторного газа впрыском воды, диспергированной центробежными форсунками, предназначенной для повышения уровня экологической безопасности при утилизации отходов.*

**Ключевые слова:** утилизация, отходы, экологическая безопасность, диоксины, математическое моделирование, двухфазная многокомпонентная среда.

## 1. Введение

Актуальность проблемы постоянного увеличения объемов отходов очевидна. Их постоянное накопление приводит к снижению уровня экологической безопасности. Наиболее распространенными методами утилизации отходов жизнедеятельности являются термические. Как правило, при этом образуются высокотоксичные соединения, для улавливания которых требуется сложная система очистки, и затраты на утилизацию получаются сопоставимыми со стоимостью производства первичной продукции. Обеспечить экологическую безопасность и снизить затраты на утилизацию позволяет реализация системы управления экологической безопасностью, в основу которой положен способ смешанной газификации отходов [1, 2]. При этом обеспечиваются не только сокращение объемов отходов, но выработка топливных продуктов для поддержания реакции газификации и частично для реализации. Наибольшая экологическая эффективность достигается предотвращением образования диоксинов и фуранов на этапе обработки отходов в термохимической пиролизной печи и на выходе из печи при охлаждении генераторного газа.

В работе представлено математическое описание процесса охлаждения генераторного газа в установке утилизации отходов жизнедеятельности.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Диоксины, как показано в работе [3], по уровню экологической опасности превосходят все известные токсины. Не разлагаясь в окружающей среде и накапливаясь в верхнем слое почвы, они являются источником загрязнения. Механизмы формирования диоксинов описаны в работах авторов [4, 5].

Плазменная технология как альтернатива любым способам сжигания заключается в разложении сложных молекул веществ на простые в условиях экстремально высоких температур и при отсутствии свободного кислорода.

Вопросами плазменной газификации опасных отходов занимаются ученые разных стран: США, Швейцарии, Германии, Японии, Кореи, Беларуси, Украины и других [6–10]. Вопросы применения плазменных технологий для получения синтез-газа из жидких и других отходов конкретизированы и детализированы в работах М. Н. Бернадинера, И. М. Бернадинера, А. Н. Братцева, С. В. Петрова, Г. С. Маринского, В. Н. Коржика, А. В. Чернеца и др. Проектированием и изготовлением плазменной шахтной печи и мобильной плазменной установки для уничтожения токсичных отходов занимаются ученые А. Л. Моссэ, В. В. Савчин, А. В. Горбунов. Способ переработки медицинских и/или биологических отходов с применением плазменных технологий и устройству для его осуществления описаны в патенте Беларуси авторами В. В. Савчиным, А. Л. Моссэ, А. В. Ложечником.

Общий подход к созданию системы управления экологической безопасностью при утилизации твердых бытовых и производственных отходов рассмотрен в работе [2]. В данной работе предотвращение образования высокотоксичных веществ на выходе из термохимической пиролизной печи предлагается обеспечить путем резкого охлаждения генераторного газа.

Существуют различные способы охлаждения горячих дымовых газов, однако достаточно трудно реализовать резкое его охлаждение в широком диапазоне температур [11, 12]. Одним из рациональных вариантов решения этой проблемы, является применение способа оросительного охлаждения генераторного газа впрыском воды, диспергированной центробежными форсунками, в газоотводящую трубу и формирования в ней водного аэрозоля с дисперсностью и временем пребывания, необходимыми для эффективного охлаждения генераторного газа в пределах рабочей зоны.

Подобные оросительные системы применяют при тушении пожаров, создании мелкодисперсных структур для обеспечения экологической безопасности, пылеподавлении при погрузочно-разгрузочных работах пылеобразующих материалов, снижении уровня метанугольных

взрывообразующих веществ в угольных шахтах. В работах [13–20] авторами рассмотрены математические модели и выполнены численные исследования этих процессов. Однако следует заметить, что при решении вышеперечисленных задач рассматривались конкретные технические условия и требования. На сегодня существует только общий подход физико-математической постановки этого класса задач, основанный на классических уравнениях гидродинамики.

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.

Диоксины образуются в газовой фазе в пламени из углеводородов и хлоридов, таких, как фенол и HCl. При охлаждении дымовых газов в диапазоне температур 300...450 °С наблюдается повторное формирования диоксинов (de novo). Максимум их формирования приходится на 400 °С, а факторами формирования являются скорость охлаждения газов и наличие кислорода.

Правильно организованный термодинамический процесс позволит эффективно снизить концентрацию высокотоксичных веществ, а применение численного моделирования с определением необходимых режимов, организации пространственной структуры охлаждающей водяной завесы позволит разработать технологические решения, обеспечивающие экологическую безопасность при утилизации. Для проведения численного моделирования и визуализации результатов процесса охлаждения генераторного газа необходимо опираться на математический аппарат, адекватно отображающий сложные газодинамические процессы. В случае, рассматриваемом авторами статьи, необходимо учитывать как газовую, так и дисперсную фазы процесса охлаждения. Дополнением для математической модели является описание межфазного взаимодействия.

Опираясь на классические законы сохранения массы и количества движения применительно к неоднородной по компонентному и фазовому составу среде, необходимо получить математическую модель, позволяющую в дальнейшем проводить расчеты и анализировать целостную картину сложных газодинамических процессов, снижающих возможность образования высокотоксичных веществ.

### 3. Объект, цель и задачи исследования

Газодинамические процессы межфазного взаимодействия при оросительном охлаждении генераторного газа являются в данной работе объектом исследования.

Цель данного исследования состоит в разработке математических моделей дисперсной фазы и математическом описании межфазного взаимодействия в системе охлаждения генераторного газа, предназначенной для повышения уровня экологической безопасности при утилизации отходов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ и математическое описание поведения дисперсной фазы при оросительном охлаждении генераторного газа с целью снижения вероятности образования диоксинов при утилизации отходов;
- исследование межфазного взаимодействия и его влияния на эффективность предлагаемой системы охлаждения генераторного газа впрыском воды, диспергированной центробежными форсунками, предназначенной для повышения уровня экологической безопасности при утилизации отходов.

## 4. Материалы и методы исследования поведения газовой и дисперсной фазы при охлаждении генераторного газа диспергированной жидкостью

**4.1. Математическая модель газовой фазы охлаждения генераторного газа.** Для математического моделирования использован классический подход описания процессов течения и теплообмена двухфазной многокомпонентной среды с фазовым превращением (испарением) в газоотводящей трубе (рис. 1). Оросительная система представляет собой центробежные форсунки, которые размещены в газоотводящей трубе со смещением в плоскости с тем, чтобы обеспечить полное перекрытие площади сечения канала (рис. 2). Газ, проходящий через распыленную воду, нагревает ее и отводит тепло за счет теплоты испарения.

Описание математической модели газовой фазы охлаждения генераторного газа представлено в работе [21]. В ней показано, что в общем случае в рабочей зоне движется двухфазный поток, содержащий генераторный газ и полидисперсный водный аэрозоль. Математическая модель газовой фазы необходима 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.

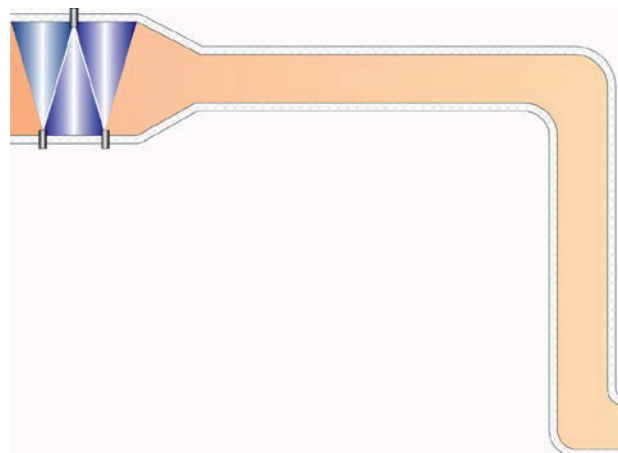


Рис. 1. Газоотводящая труба



Рис. 2. Просительная система для охлаждения газа: большей окружностью показан исследуемый участок газотводящей трубы, меньшей — место установки одной из форсунок

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

**4.2. Математическая модель дисперсной фазы охлаждения генераторного газа.** Основные соотношения физико-математической постановки задачи используют классический подход движения двухфазного потока. Подобное описание использовано в работе [20] для определения физических, кинематических и геометрических параметров процесса установки водных завес.

В исследуемом участке газотводящей трубы движется двухфазный поток, содержащий генераторный газ и полидисперсный водный аэрозоль. Объемная концентрация водяных капель в потоке невелика и движение невзаимодействующих капель различных размеров можно рассматривать в отдельности. В отношении дисперсной фазы принимаем следующие основные допущения:

- дисперсная фаза представляет собой полностью распыленный факел жидкости (воды), состоящий из конечного множества испаряющихся сферических капель различных диаметров;
- всеми силами, действующими на каплю, кроме сил тяжести и аэродинамического сопротивления, пренебрегаем;
- процессами вторичного дробления и коагуляции капель пренебрегаем.

При сделанных выше допущениях поведение дисперсной фазы (капель воды) удобно рассматривать в лагранжевом описании. Для распыленных жидкостей общепринятым распределением капель по размерам считается выражение Розина — Раммлера. Весь диапазон начальных размеров капель делится на определенное число дискретных интервалов; каждый из них представляется средним начальным диаметром, для которого выполняется траекторный расчет. При этом каждая моделируемая капля фактически представляет собой «пакет» капель с одинаковыми траекториями.

Если распределение капель по размерам описывается формулой Розина — Раммлера, то массовая доля капель с диаметром, большим  $d$ , определяется по формуле:

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n}, \quad (1)$$

где  $\bar{d}$  — средний медианный диаметр капель в распыле, соответствующий значению  $Y_d = e^{-1} \approx 0,368$ ;  $n$  — параметр распределения.

Движение частицы дисперсной фазы (капли) описывается основным уравнением динамики (вторым законом Ньютона). При сделанных выше допущениях уравнение движения одиночной капли в векторной форме имеет вид:

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{G} + \vec{F}_R, \quad (2)$$

где  $m_p$  — масса капли;  $\vec{u}_p$  — скорость капли;  $t$  — время;  $\vec{G}$  — сила тяжести:

$$\vec{G} = m_p \vec{g}, \quad (3)$$

$\vec{g}$  — ускорение свободного падения;  $\vec{F}_R$  — сила аэродинамического сопротивления капли:

$$\vec{F}_R = 0,5 \cdot C_R A_p \rho |\vec{u} - \vec{u}_p| (\vec{u} - \vec{u}_p), \quad (4)$$

где  $C_R$  — коэффициент аэродинамического сопротивления капли;  $A_p$  — площадь миделевого сечения капли;  $\rho$  — плотность газа;  $\vec{u}$  — скорость газа.

Подставляя выражения (3) и (4) в уравнение (2) и учитывая, что масса сферической капли и площадь ее миделевого сечения определяются выражениями:

$$m_p = \rho_p \frac{\pi d_p^3}{6}, \quad (5)$$

$$A_p = 0,25\pi d_p^2, \quad (6)$$

и спроецировав векторы обеих частей уравнения (2), [21] на оси неподвижной декартовой системы координат, получим систему уравнений движения капли в виде:

$$\frac{du_{pj}}{dt} = \rho_p \frac{\pi d_p^3}{6} g_j - \frac{3\rho C_R}{4\rho_p d_p} (u_{pj} - u_j) \left[ \sum_j (u_{pj} - u_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

где  $j = 1, 2, 3$ .

Для расчета траектории капли систему (7) следует дополнить следующими очевидными уравнениями:

$$\frac{dx_{pj}}{dt} = u_{pj}, \quad j = 1, 2, 3, \quad (8)$$

где  $x_j$  — декартовы координаты капли.

При умеренных значениях относительных скоростей движения капель, когда сжимаемостью можно пренебречь, коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_R$  сферической капли является однозначной функцией от относительного числа Рейнольдса, определяемого как:

$$Re_p = \frac{\rho d_p |\ddot{u} - \ddot{u}_p|}{\mu}, \quad (9)$$

где  $d_p$  – диаметр капли;  $\mu$  – динамическая вязкость газа.

Для аппроксимации зависимости  $C_R(Re_p)$  использована эмпирическая формула Чжена – Тризека [22]:

$$C_R = \frac{24}{Re_p} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re_p}} + 0,27. \quad (10)$$

Тепломассообмен каплей описывается двумя моделями – испарения и кипения. Модель испарения действует до тех пор, пока температура капли не достигнет точки кипения  $T_{bp}$ . При достижении точки кипения теплообмен капли определяется скоростью кипения.

Модель испарения предполагает, что скорость испарения капли определяется законом Фика:

$$\frac{dm_v}{dt} = A_v D \rho \frac{dc}{dr}, \quad (11)$$

где  $m_v$  – масса пара;  $\rho$  – плотность газа;  $D$  – коэффициент бинарной диффузии пара в газе;  $c$  – объемная концентрация пара;  $A_v$  – площадь поверхности испарения;  $t$  – время;  $r$  – радиальная координата.

Разделив переменные и проинтегрировав уравнение (11) с граничными условиями  $c = c_s$  при  $r = r_p$ ,  $c = c_\infty$  при  $r = \infty$ , получим:

$$\frac{dm_v}{dt} = \beta A_v \rho (c_s - c_\infty), \quad (12)$$

где  $c_s$  – объемная концентрация пара у поверхности капли;  $r_p$  – радиус капли;  $c_\infty$  – объемная концентрация пара в окружающем газе;  $\beta$  – коэффициент испарения, определяемый экспериментально.

Результаты экспериментальных исследований обычно представляют в виде критериальных зависимостей  $Sh(Re, Sc)$ , где  $Sh$  – число Шервуда, определяемое как:

$$Sh = \frac{\beta d_p}{D}. \quad (13)$$

С учетом (13) и того, что площадь испарения сферической капли  $A_v = \pi d_p^2$ , уравнение (12) принимает вид:

$$\frac{dm_v}{dt} = Sh \rho D \pi d_p^2 (c_s - c_\infty). \quad (14)$$

Для аппроксимации критериальной зависимости  $Sh(Re, Sc)$  использована эмпирическая формула Ранца – Маршалла [23]:

$$Sh = 2 + 0,6 Re^{0,5} Sc^{0,33}. \quad (15)$$

Концентрация пара на поверхности капли вычисляется, исходя из предположения, что парциальное давле-

ние пара на поверхности равно давлению насыщенного пара  $p_{sat}$  при температуре капли  $T_p$ :

$$c_s = \frac{M_v p_{sat}}{M_v p_{sat} + M(p - p_{sat})}, \quad (16)$$

где  $M$  и  $M_v$  – молекулярные массы газа и пара соответственно;  $p$  – абсолютное давление парогазовой смеси.

Уравнение для скорости уменьшения диаметра испаряющейся капли можно получить, продифференцировав уравнение (14) по времени:

$$\frac{dm_p}{dt} = 0,5 \pi \rho_p d_p^2 \frac{d(d_p)}{dt}. \quad (17)$$

С учетом очевидного соотношения  $\frac{dm_p}{dt} = -\frac{dm_v}{dt}$  из (14) и (17) получим:

$$\frac{d(d_p)}{dt} = -\frac{2 Sh \rho D}{\rho_p d_p} (c_s - c_\infty). \quad (18)$$

Температура капли изменяется до достижения ею температуры кипения в соответствии с балансом тепла, определяемым уравнением:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha A_v (T_\infty - T_p) + L \frac{dm_v}{dt}, \quad (19)$$

где  $c_p$  – теплоемкость капли;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи между каплей и газом, определяемый экспериментально;  $A_v$  – площадь поверхности капли;  $L$  – скрытая теплота испарения;  $T_p$  – температура капли;  $T_\infty$  – локальная температура газа.

Результаты экспериментальных исследований обычно представляют в виде критериальных зависимостей  $Nu(Re, Pr)$ , где  $Nu$  – число Нуссельта, определяемое как:

$$Nu = \frac{\alpha \lambda d_p}{\lambda}, \quad (20)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность газа.

С учетом (14) и (20) уравнение (19) можно представить в виде:

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{(T_\infty - T_p)}{\Theta} + \frac{Q_L}{\Theta}, \quad (21)$$

где

$$Q = \frac{L Sh \rho D (c_s - c_\infty)}{Nu \lambda}, \quad (22)$$

$$\Theta = \frac{\rho_p d_p^2 c_p}{6 Nu \lambda}. \quad (23)$$

Исходя из допущения о полной аналогии между тепло- и массообменом для определения числа Нуссельта, для аппроксимации критериальной зависимости  $Nu(Re, Pr)$  использована зависимость, аналогичная формуле (15):

$$Nu = 2 + 0,6Re^{0,5}Pr^{0,33}. \tag{24}$$

Когда температура капли достигает точки кипения, вместо уравнения (18) применяется уравнение скорости кипения:

$$\frac{d(d_p)}{dt} = -\frac{4\lambda}{\rho_p c_{p\infty} d_p} \left( 1 + 0,23Re_p^{0,5} \ln \left[ 1 + \frac{c_{p\infty}(T_\infty - T_p)}{L} \right] \right), \tag{25}$$

где  $c_{p\infty}$  — теплоемкость газа.

Уравнение (25) выведено в предположении стационарного течения при постоянном давлении. Считается, что, пока применяется закон кипения, капля сохраняет постоянную температуру.

Таким образом, поведение одиночной капли в известном газодинамическом поле описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) (7), (8), (18), (21), (25). В этой системе искомыми функциями являются проекции абсолютной скорости капли  $u_{pj}$  — ее координаты  $x_{pj}$ , диаметр  $d_p$  и температура  $T_p$ . Остальные величины служат параметрами. Часть из этих параметров функционально связана с независимыми переменными. Поэтому для замыкания системы ее необходимо дополнить алгебраическими соотношениями (1), (9), (10) (13), (15), (16), (20), (24), а также уравнениями, выражающими зависимость теплофизических свойств капли от ее температуры.

**Начальные условия.** Для численного решения системы ОДУ необходимо задать начальные условия, то есть значения независимых переменных в начальный момент времени  $t = 0$ :  $u_{pj0}$ ,  $x_{pj0}$ ,  $d_p$  и  $T_p$ .

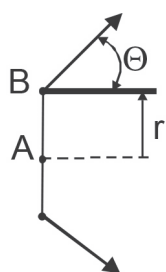


Рис. 3. Схема ввода каплей

При моделировании полагалось, что капли стартуют через три (по количеству форсунок) ввода типа «кромка конуса»: точки В старта каплей равномерно распределены по окружности радиуса  $r$  с центром в точке А (рис. 3).

Начальные диаметры представительных каплей  $d_p$  задавались гистограммой начального распределения каплей по размерам, построенной с помощью уравнения (1). Начальная скорость каплей полагалась равной скорости истечения жидкости из сопла форсунки, начальная температура каплей — равной 20 °С. Начальное направление вектора начальной скорости каплей определялось по значению корневого угла факела распыливания.

**4.3. Модель межфазного взаимодействия.** Взаимодействие между фазами учитывается с помощью дискретной модели «частица — источник в ячейке», в соответствии с которой присутствие капли в потоке проявляется через дополнительные источники в уравнениях сохранения сплошной фазы [18]. Во время расчета траекторий каплей

отслеживаются импульс, масса и теплота, приобретаемые или теряемые «пакетом» каплей, следующих вдоль данной траектории. Затем эти значения включаются в расчет газовой фазы в виде источниковых членов  $Sm$ ,  $Sq$ ,  $Sfi$  в уравнениях газовой динамики. Таким образом, поскольку газовая фаза уже оказывает воздействие на дисперсную фазу через уравнения (7), (8), (18), (21), (25), учитывается 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. Схема модели межфазного взаимодействия показана на рис. 4.

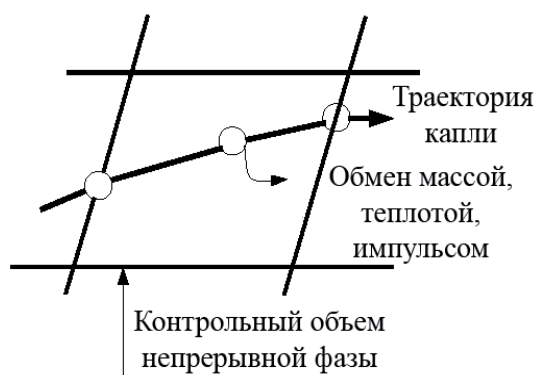


Рис. 4. Схема модели межфазного взаимодействия

**Обмен массой.** Перенос массы от дисперсной фазы к непрерывной фазе рассчитывается путем оценки изменения массы капли при ее прохождении через каждый контрольный объем геометрической модели.

Это изменение массы рассчитывается как

$$\Delta S_m = \sum \left( \frac{\Delta m_p}{m_{p0}} \cdot \dot{m}_{p0} \right), \tag{26}$$

где  $\Delta m_p$  — изменение массы капли в контрольном объеме;  $m_{p0}$  — начальная масса капли;  $\dot{m}_{p0}$  — начальное значение массового расхода каплей.

**Обмен импульсом.** Перенос импульса от непрерывной фазы к дисперсной фазе вычисляется путем оценки изменения импульса капли при ее прохождении через каждый контрольный объем геометрической модели. Это изменение импульса рассчитывается как:

$$\Delta S_{fi} = \sum \left( \frac{2\mu C_R Re_p}{3\rho_p d_p^2} (u_{pi} - u_i) \cdot \dot{m}_p \Delta t \right), \tag{27}$$

где  $\dot{m}_p$  — массовый расход пара от капли;  $\Delta t$  — шаг по времени.

**Теплообмен.** Перенос тепла от непрерывной фазы к дисперсной фазе определяется путем оценки изменения энтальпии капли при ее прохождении через каждый контрольный объем геометрической модели. Это изменение рассчитывается как:

$$\Delta S_q = \sum \left( \frac{\bar{m}_p}{m_{p0}} c_p \Delta T_p + \frac{\Delta m_p}{m_{p0}} \left( -L + \int_{T^0}^{T_p} c_{pi}(T) dT \right) \cdot \dot{m}_{p0} \right), \tag{28}$$

где  $\bar{m}_p$  — средняя масса капли в контрольном объеме;  $c_p$  — теплоемкость капли;  $\Delta T_p$  — изменение температуры капли в контрольном объеме;  $L$  — скрытая теплота испарения;  $c_{r1}$  — теплоемкость пара жидкости;  $T_p$  — температура капли на выходе из контрольного объема;  $T^0$  — стандартная температура для энтальпии.

### 5. Результаты исследования газодинамических процессов, происходящих при оросительном охлаждении генераторного газа в газоотводящем канале

Представленная ранее математическая модель газовой составляющей охлаждения генераторного газа позволяет описать особенности трехмерных течений в газоотводящем канале и показывает воздействие на дисперсную фазу.

Для анализа поведения дисперсной фазы в ее отношении были приняты некоторые допущения, что позволило рассматривать ее поведение в лагранжевом описании. Установлено, что поведение одиночной капли в газодинамическом поле описывается системой ОДУ, в которой часть параметров функционально связана с независимыми переменными. Для замыкания и решения данной системы ОДУ необходимо учитывать двухстороннее взаимодействие путем поочередного решения уравнений дисперсной и непрерывной фаз до тех пор, пока решения обеих фаз не установятся.

### 6. Обсуждение результатов проведенного исследования

Полученные математические модели газовой и дисперсной фаз являются основой для проведения численного эксперимента по исследованию эффективности предлагаемой системы охлаждения генераторного газа в вопросах повышения уровня экологической безопасности при утилизации отходов. Используя метод численного интегрирования полученных уравнений газовой фазы, можно определить параметры газа в любой точке расчетной области, что позволит контролировать температуру газового потока в требуемых сечениях блока охлаждения и скорость ее изменения. Как уже было отмечено ранее, резкое понижение температуры горячего газового потока до безопасного значения дает возможность снизить вероятность образования диоксинов. Численное интегрирование полученных уравнений дисперсной фазы позволит получить параметры подачи воды форсунками, при которых обеспечивается резкое понижение температуры газового потока и, как следствие, повышение уровня экологической безопасности при утилизации отходов.

### 7. Выводы

Проведенными исследованиями газодинамических процессов, которые происходят в блоке охлаждения генераторного газа за счет впрыска воды, диспергированной центробежными форсунками, установлены системы уравнений, описывающих поведение газовой, дисперсной фаз, а также межфазное взаимодействие. При описании поведения капель в горячем газовом потоке тепломассообмен капель представлен двумя моделями —

испарения и кипения. При расчете траекторий капель отслеживаются импульс, масса и теплота, приобретаемые или теряемые совокупностью капель, следующих вдоль данной траектории. Полученные математические модели позволяют провести численный эксперимент при определенных начальных условиях. В настоящее время численный эксперимент становится одним из наиболее экономичных и удобных способов детального анализа сложных процессов в газодисперсных средах.

### Литература

1. Нечипорук, Н. В. Альтернативная технология утилизации отходов жизнедеятельности [Текст] / Н. В. Нечипорук, В. Ш. Эрсамбетов // Экологічна безпека. — Кременчуг: КрНУ, 2012. — Вып. 2(14). — С. 80–84.
2. Кобрин, В. Н. Система управления экологической безопасностью при утилизации твердых бытовых и производственных отходов [Текст] / В. Н. Кобрин, Н. В. Нечипорук, В. В. Вамболь // Экологічна безпека. — Кременчуг: КрНУ, 2014. — Вып. 2(18). — С. 25–30.
3. Федоров, Л. А. Диоксины как экологическая опасность: ретроспектива и перспективы [Текст] / Л. А. Федоров // Распад и образование диоксина при горении отходов. — М.: Наука, 1994. — Т. 13, № 2. — С. 17–33.
4. Милош, В. В. Диоксины и их потенциальная опасность в экосистеме «человек — окружающая среда» [Электронный ресурс] / В. В. Милош. — Режим доступа: \www/URL: <http://crowngold.narod.ru/articles/dioxini.htm>
5. Сленкин, М. В. Образование диоксинов при термической утилизации твердых бытовых отходов [Текст]: материалы II Междунар. конф., 9–10 февраля 2005 г. / М. В. Сленкин, Н. М. Жовмир, К. А. Дрозд // Сотрудничество для решения проблемы отходов. — X., 2005. — С. 253–255.
6. Themelis, N. J. Technical and economic analysis of Plasma-assisted Waste-to-Energy processes [Text] / Nickolas J. Themelis, Marco J. Castaldi. — Columbia: Columbia University, 2010. — 79 p.
7. Hyun-Seo Park. Medical Waste Treatment Using Plasma [Text] / Hyun-Seo Park, Beom-Jae Lee, Seong-Jung Kim // Industrial & Engineering Chemistry. — 2005. — V. 11, № 3. — P. 353–360.
8. Ha, S. A. Waste incineration [Text] / S. A. Ha, H. J. Son, N. C. Sung // J. Korea Society of Waste Management. — Korea, 2000. — V. 17. — 665 p.
9. Park, H. S. The formation of dioxins from waste incineration [Text] / H. S. Park, J. D. Chung // J. Korea Society of Waste Management. — Korea, 2001. — V. 18. — 302 p.
10. Park, H. S. Secondary environmental problem during incineration [Text] / H. S. Park, B. J. Lee // J. Korea Society of Waste Management. — Korea, 2001. — V. 218. — 722 p.
11. Вамболь, В. В. Моделирование газодинамических процессов в блоке охлаждения генераторного газа установки для утилизации отходов [Электронный ресурс]: интернет-журнал / В. В. Вамболь // Технологии техносферной безопасности. — Вып. 1(59). — 2015. — Режим доступа: \www/URL: <http://ipb.mos.ru/ttb/index.html>
12. Вамболь, В. В. Снижение уровня диоксинов при утилизации отходов [Текст]: сб. ст. по материалам III Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 19 декабря 2014 г.; в 2 ч. / В. В. Вамболь, ФГБОУ ВПО Воронежский институт ГПС МЧС России // Проблемы безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. — Воронеж, 2014. — Ч. 1 — С. 216–218.
13. Вамболь, С. А. Моделирование системы управления экологической безопасностью с использованием многофазных дисперсных структур при взрыве метановоздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт [Текст]: сб. науч. тр. / С. А. Вамболь, Ю. А. Скоб, Н. В. Нечипорук // Вестник Казан. технол. ун-та. — Казань: КНИТУ, 2013. — Т. 16, № 24. — С. 68–74.
14. Вамболь, С. А. Системы управления экологической безопасностью, которые используют многофазные дисперсные структуры [Текст]: монография / С. А. Вамболь. — X.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2013. — 204 с.
15. Launder, B. E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence [Text] / B. E. Launder, D. B. Spalding. — London: Academic Press, 1972. — 458 p.

16. Launder, B. E. The Numerical Computation of Turbulent Flows [Text] / B. E. Launder, D. B. Spalding // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. — 1974. — № 3. — P. 269–289.
17. Schmidt, D. P. A Two-Dimensional, Non-Equilibrium Model of Flashing Nozzle Flow [Text] / D. P. Schmidt, M. L. Corradini, C. J. Rutland // Proceedings of the 3rd ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference, July 18–23, 1999, San Francisco, Calif. — American Society of Mechanical Engineers, 2000. — 1322 p.
18. Crowe, C. T. The Particle-Source-In Cell (PSI-CELL) Model for Gas-Droplet Flows [Text] / C. T. Crowe, M. P. Sharma, D. E. Stock // Journal of Fluids Engineering. — 1977. — Vol. 99, № 2. — P. 325–332. doi:10.1115/1.3448756
19. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский. — М.: Наука, 1978. — 736 с.
20. Вамболь, С. А. Моделирование дисперсной фазы процесса установки водных завес в системах управления экологической безопасностью [Текст] / С. А. Вамболь // Экологічна безпека. — Кременчук: КрНУ, 2012. — Вып. 2(14). — С. 15–18.
21. Вамболь, В. В. Математическое моделирование газовой фазы охлаждения генераторного газа установки утилизации отходов жизнедеятельности [Текст] / В. В. Вамболь // Вісник Кременч. нац. ун-ту імені Михайла Остроградського. — Кременчук: КрНУ, 2014. — Вып. 6(89). — Ч. 1. — С. 148–152.
22. Костюк, В. Е. К выбору аппроксимирующего выражения для коэффициента аэродинамического сопротивления капли [Текст]: сб. науч. тр. / В. Е. Костюк // Науч.-метод. материалы по теории авиационных двигателей. — Х.: ХВВА-ИУ, 1988. — Вып. 6. — С. 13–21.
23. Шервуд, Т. Массопередача [Текст] / Т. Шервуд, Р. Пинфорд, Ч. Уилки. — М.: Машиностроение, 1988. — 600 с.

#### МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗУ ПРИ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

Подано математичний опис процесу охолодження генераторного газу при утилізації відходів. На основі класичної теорії газодинаміки отримано математичні співвідношення, що описують газову і дисперсну фази. Досліджено міжфазну взаємодію і її вплив на ефективність запропонованої системи охолодження генераторного газу вприскуванням води, диспергованої відцентровими форсунками, призначеної для підвищення рівня екологічної безпеки при утилізації відходів.

**Ключові слова:** утилізація, відходи, екологічна безпека, діоксини, математичне моделювання, двофазне багатокомпонентне середовище.

**Вамболь Виола Владиславовна**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра хімії, екології та експертних технологій, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна, e-mail: violavambol@gmail.com.

**Костюк Володимир Євгеньевич**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, проблемна науково-дослідницька лабораторія діагностики авіаційних двигателів кафедри конструкції авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна, e-mail: kostyuk.v@mail.ru.

**Кириляш Елена Іванівна**, проблемна науково-дослідницька лабораторія діагностики авіаційних двигателів кафедри конструкції авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна, e-mail: kirilash-elena@rambler.ru.

**Вамболь Виола Владиславівна**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра хімії, екології та експертних технологій, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна.

**Костюк Володимир Євгеньевич**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, проблемна науково-дослідницька лабораторія діагностики авіаційних двигателів кафедри конструкції авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна.

**Кириляш Елена Іванівна**, проблемна науково-дослідницька лабораторія діагностики авіаційних двигателів кафедри конструкції авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна.

**Vambol Viola**, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Ukraine, e-mail: violavambol@gmail.com.

**Kostiuk Volodymyr**, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Ukraine, e-mail: kostyuk.v@mail.ru.

**Kyrylash Olena**, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Ukraine, e-mail: kirilash-elena@rambler.ru

УДК 664.934-022.233:613.292-027.2

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.40509

Агунова Л. В.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЖИРОВОГО СОСТАВА ПЕЧЕНОЧНЫХ ПАШТЕТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В статье представлены результаты оптимизации жирового состава печеночных паштетов функционального назначения с использованием предложенной Харрингтоном функции желательности D. Разработано обобщающую модель оценки качества паштета, учитывающую влияние многих критериев с ограничениями по показателям качества и содержанию функциональных ингредиентов. Установлена оптимальная массовая доля растительного масла в рецептурах новых видов функциональных мясопродуктов.

**Ключевые слова:** оптимизация, жировой состав, функциональные продукты, печеночные паштеты, функция Харрингтона.

### 1. Введение

Основным фактором в обеспечении оптимального роста и развития, адаптации к влиянию неблагоприятных

агентов окружающей среды, качества и длительности жизни, способности к воспроизводству является питание.

Важное место в этом процессе занимают функциональные продукты. Продукт может быть отнесен к функ-