УДК 532.2:519.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ВЫБРОСЕ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В ОТКРЫТУЮ АТМОСФЕРУ

Бочкарев С.В., Бояршинов М.Г., Цаплин А.И.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Работа выполнена в рамках работ по Постановлению Правительства РФ № 218
о создании высокотехнологичных производств

АННОТАЦИЯ

Поставлена задача о движении смеси воздуха и тяжелого нагретого газа, поступающего из локализованного источника. Для моделирования применяется система уравнений Эйлера (неразрывности, импульса, энергии, концентрации и состояния) с соответствующими краевыми условиями. Численное решение строится на основе метода крупных частиц (метод Давыдова). Вычислительный эксперимент позволяет изучать эволюцию полей скорости, плотности, энергии, давления и концентрации газовой примеси в рассматриваемой пространственной области.

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования является многоцелевой стенд испытания газотурбинных установок (ГТУ) высокой мощности (до 40 МВт), в котором возникают проблемы улавливания и нейтрализацию продуктов сгорания топлива, вместе с которыми в окружающую среду поступает значительное количество загрязняющих веществ. Испытательный стенд имеет вертикальную выхлопную трубу для отвода продуктов сгорания.

Возникает задача проведения экологического мониторинга влияния продуктов сгорания топлива – оксидов углерода и азота, паров воды, взвешенных веществ на окружающую среду с целью возможности оценки экологических последствий эксплуатации стенда.

Особенностью переноса и рассеяния весомого нагретого газа, (продуктов сгорания ГТУ) является взаимодействие механизмов положительной (повышенная температура, низкая плотность) и отрицательной (пониженная температура, высокая плотность) плавучести газов, находящихся в поле силы тяжести. Прикладное значение исследования механизмов переноса и рассеяния таких газов атмосферными потоками определяется наличием значительного числа реальных процессов, в том числе формирование и перенос на дальние расстояния облака продуктов сгорания ГТУ.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для моделирования движения газовоздушного потока, образованного выбросом продуктов сгорания, поступающим из локализованного источника, используется система уравнений Эйлера, описывающая движение сплошной среды в рассматриваемой области [1] и включающая эволюционные уравнения неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = m\delta(\mathbf{r}_S) \qquad (1)$$

движения

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \quad) + \nabla P = \rho \mathbf{g} + m\mathbf{V}_m \delta(\mathbf{r}_S) \qquad (2)$$

полной удельной энергии

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \mathbf{V}) + \nabla \cdot (P\mathbf{V}) = e\delta(\mathbf{r}_S) \qquad (3)$$

состояния (адиабатический процесс)

$$\rho(k-1)(U - \mathbf{V} \quad /2) - \mu P = 0 \qquad (4)$$

и концентрации примеси (в диффузионном приближении)

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (C\mathbf{V}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla C) + q\delta(\mathbf{r}_S) \qquad (5)$$

где: ρ – плотность продуктов сгорания; V – вектор скорости потока с компонентами V_x, Vy,

© Бочкарев С.В., Бояршинов М.Г., Цаплин А.И.

Vz; U – полная удельная энергия; P – давление; μ – молярная масса; k – показатель адиабаты; δ() – дельта-функция Дирака; r_S – радиус-вектор положения точечного источника; C – концентрация газовой примеси; λ – коэффициент диффузии; g – вектор ускорения свободного падения; e – мощность точечного источника, q – интенсивность поступления продуктов сгорания из источника, m – массовый расход продуктов сгорания, поступающих из источника со скоростью V_m, $q \le m$. Принимается, что полное давление газа P может быть представлено в виде суммы гидростатической составляющей $P_g = P_0 - \rho g z$ и отклонения p давления воздуха от гидростатического, где P_0 – давление воздуха на уровне поверхности выхлопной трубы:

$$P = p + P_g \qquad (6)$$

Для учета плавучести газовой примеси применяется приближение Буссинеска, использующее разложение в частичный ряд Тейлора функции плотности продуктов сгорания:

$$\rho(C,T) = \rho(C_0,T_0) + \rho'_C(C_0)(C - C_0) + \\ + \rho'_T(T_0)(T - T_0) = \rho_0 + \alpha C + \beta(T - T_0)$$

где $\rho_0 = \rho(C_0,T_0)$, $\alpha = \rho'_C(C_0)$ – концентрационный коэффициент плотности, $\beta = \rho'_T(T_0)$– коэффициент температурного расширения выхлопных газов; T – температура продуктов сгорания; C_0 и T_0 – концентрация и температура газа в невозмущенном потоке, при этом $C_0 = 0$. Принято, что для рассматриваемого диапазона изменения T полная удельная энергия и температура связаны соотношением $U - \mathbf{V}\cdot\mathbf{V}/2 = c_V T$.

Пусть в объеме Ω содержатся воздух, имеющий плотность ρ_0, и пассивная газовая примесь с плотностью ρ_1, занимающая объем Ω1. Массы воздуха и примеси соответственно равны $m_0 = \rho_0(\Omega - \Omega_1)$ и $m_1 = \rho_1\Omega_1$. Плотность газовоздушной смеси в рассматриваемом объеме Ω определяется выражением

$$\rho = \frac{m_0 + m_1}{\Omega} = \frac{\rho_0(\Omega - \Omega_1) + m_1}{\Omega} = \rho_0 - \rho_0\frac{\Omega_1}{\Omega} + C = \\ = \rho_0 - \frac{\rho_0}{\rho_1}C + C = \rho_0 + \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_1}\right)C \quad , \qquad (7)$$

где $C = m_1/\Omega$ – концентрация газовой примеси в объеме Ω. Сравнение полученного выражения и соотношения (7) позволяет определить величину концентрационного коэффициента плотности $\alpha = 1 - \rho_0/\rho_1$.

Для определения коэффициента температурного расширения β уравнение состояния газа $P\Omega = mRT/\mu$ записывается в виде $\rho = \mu P/RT$, где R – универсальная газовая постоянная. Дифференцирование этого уравнения приводит к выражению $\partial\rho/\partial T = -\rho/T$, и таким образом, $\beta = -\rho_0/T_0$.

С учетом принятых гипотез, выражений (6) и (7), уравнения движения (2), полной удельной энергии (3) и состояния (4) принимают вид:

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{V})}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho\mathbf{V}\ \ ) + \nabla p = \\ = \mathbf{g}[\alpha C + \beta(T - T_0)] + m\mathbf{V}_m\delta(\mathbf{r}_S) \qquad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho U\mathbf{V}) + \nabla\cdot(p\mathbf{V}) = \\ -\nabla\cdot(P_g\mathbf{V}) + e\delta(\mathbf{r}_S) \qquad (9)$$

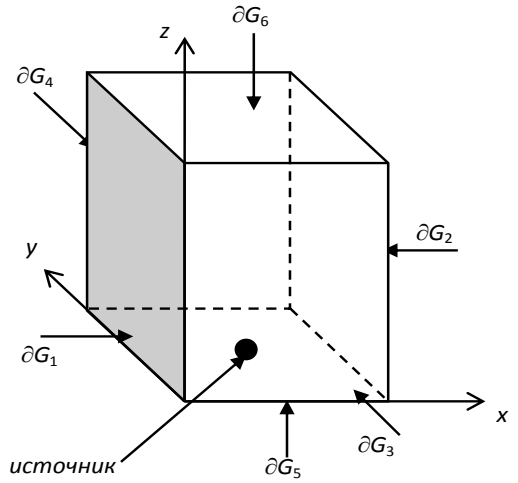

Рис.1 Схема расчетной области и обозначения ее границ

В начальный момент времени в рассматриваемой области G известны распределения компонент вектора скорости, плотности, энергии, концентрации и давления, соответствующие невозмущенному потоку, $V_x=V_0$, $V_y=0$, $V_z=0$, $C=0$, $\rho=\rho_0$, $U=U_0$, $P=P_0-\rho g z$, $\mathbf{r} \in G, t = 0$ (схема расчетной области приведена на рис.1). На входной границе ∂G_1, а также на боковых границах ∂G_3 и ∂G_4 поддерживаются значения компонент вектора скорости, плотности, энергии и концентрации, соответствующие невозмущенным значениям, $V_x=V_0$, $V_y=0$, $V_z=0$, $\rho=\rho_0$, $U=U_0$, $C=0$, $\mathbf{r} \in \partial G_1 \cup \partial G_3 \cup \partial G_4, t > 0$. На выходной границе ∂G_2 заданы условия переноса всех искомых величин, $\partial V_x/\partial x = 0$, $\partial V_y/\partial x = 0$, $\partial V_z/\partial x = 0$, $\partial\rho/\partial x = 0$, $\partial U/\partial x = 0$, $\partial C/\partial x = 0$, $\mathbf{r} \in \partial G_2, t > 0$. На нижней ∂G_5 и верхней ∂G_6 границах заданы условия переноса всех искомых величин, $\partial V_x/\partial z = 0$, $\partial V_y/\partial z = 0$, $\partial V_z/\partial z = 0$, $\partial\rho/\partial z = 0$, $\partial U/\partial z = 0$, $\partial C/\partial z = 0$, $\mathbf{r} \in \partial G_5 \cup \partial G_6, t > 0$.

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ

Для решения прикладных задач газовой динамики интенсивно развивается и успешно применяется метод крупных частиц (метод Давыдова [2]), позволяющий выполнять расчеты вихревых структур с учетом отрывных явлений, исследовать фильтрационные и струйные течения, газо- и гидродинамические потоки с большими перемещениями и соударяющимися поверхностями раздела, движение многокомпонентных, сыпучих и деформируемых сред, течения сквозь проницаемые объекты и многие другие процессы. В соответствии с идеей метода крупных частиц система уравнений (1), (5), (8)–(10) расщепляется по физическим процессам. Расчет каждого временного слоя разбивается на три этапа. Первый (эйлеровый) этап предполагает, что изменяются лишь величины, относящиеся к ячейке в целом, а сплошная среда предполагается заторможенной.

На втором (лагранжевом) этапе вычисляются эффекты переноса, учитывающие обмен между ячейками при их перестройке на прежнюю эйлерову сетку, определяются потоки массы через границы эйлеровых ячеек за шаг интегрирования по времени.

На третьем, заключительном этапе окончательные значения массы, импульса и энергии в очередной момент времени определяются законами сохранения массы, импульса и энергии, записанными с учетом промежуточных значений параметров потока, вычисленных на втором этапе интегрирования.

На основе изложенного подхода к решению поставленной задачи построен комплекс вычислительных программ, позволяющий исследовать перенос и рассеяние нагретого газа, эмитированного локализованным источником. Тестирование и верификация программного комплекса [3] выполнены с использованием точного решения задачи о стационарном течении идеального сжимаемого газа из точечного источника [4] при аппроксимации расчетной области (рис.1) с использованием от 216 до $8 \cdot 10^6$ расчетных ячеек.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Вычислительный эксперимент проводился в трехмерной постановке для области с размерами 40×40 м соответственно по ширине и глубине и 60 м по высоте; температура окружающей среды T_0 = 300ºК. Для аппроксимации области использована регулярная сетка с числом ячеек 3,6 млн; шаг интегрирования по времени принят равным 10^{-5} с.

На первом этапе исследовались закономерности потока выхлопных газов, выбрасываемых из трубы вертикально вверх при испытании ГТУ мощностью 25 МВт. При этом объемный расход продуктов сгорания составляет 241 м^3/с, средняя скорость продуктов сгорания на выходе из трубы – 44 м/с.

На рис.2–4. представлено типичное распределение скорости выхлопных газов, поле температур и изоконцентраты примеси в потоке выхлопных газов над верхним срезом выпускной трубы через 1 с после начала выброса.

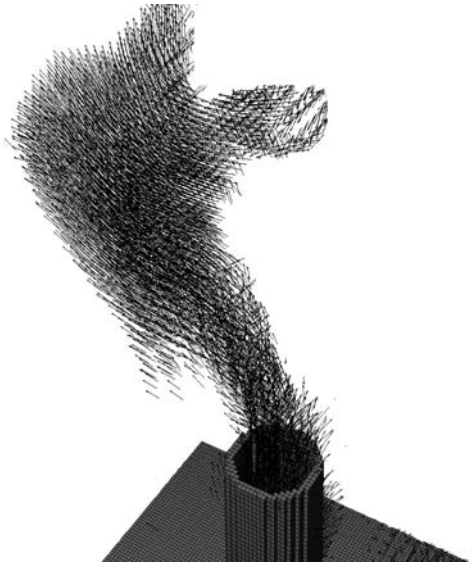

Рис.2 Распределение скорости потока выхлопных газов над верхним срезом выпускной трубы

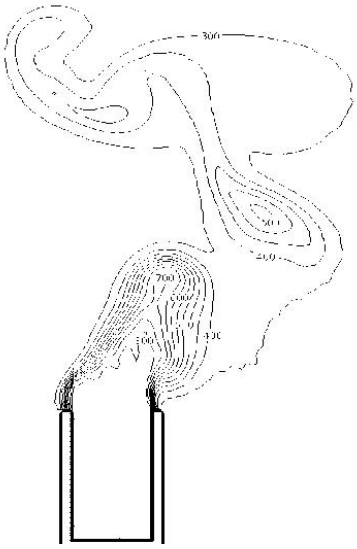

Рис.3 Распределение температуры (по шкале Кельвина) над верхним срезом выпускной трубы

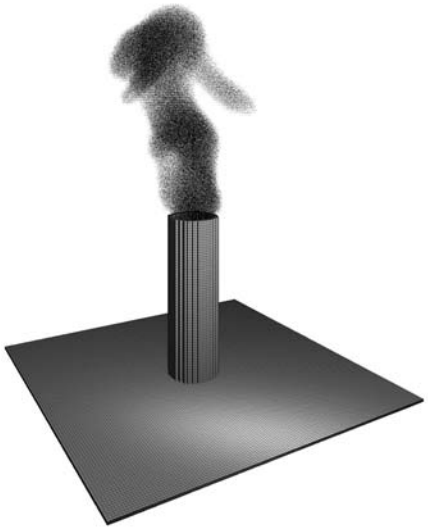

Рис.4 Расмпределние концентрации примеси в потоке отработанных газов над верхним срезом выпускной трубы

ВЫВОДЫ

Математическая модель переноса и рассеяния нагретого газа строится на основе использования системы уравнений Эйлера, включающей дифференциальные уравнения неразрывности, импульса, энергии, концентрации, а также уравнение состояния с соответствующими начальными и граничными условиями. Для построения разрешающих соотношений применяется метод крупных частиц. Верификация математической модели выполнена с использованием точного решения системы уравнений Эйлера. Компьютерная модель позволяет получать распределения полей скорости, плотности, энергии, давления и концентрации в рассматриваемой области для произвольных моментов времени, исследовать эволюцию газодинамических характеристик газовоздушной смеси, формы и размеров облака.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бояршинов М.Г., Цаплин А.И. Моделирование переноса метана в атмосфере и оценка возможности его детонаций при аварийном сбросе давления в газопроводе // Науч.-техн. вестник СПбГПУ. – СПб.: Санкт-Петербургский гос. политехн. ун-т, 2010. - N 98(2). – С. 21-31.
2. Численное исследование актуальных проблем машиностроения и механики сплошных и сыпучих сред методом крупных частиц: В 5 томах / Ю.М. Давыдов, М.Ж. Акжолов, П.М. Алабужев и др.; Под. ред. Ю.М. Давыдова. – М.: Национальная академия прикладных наук, 1995. – 1658 с.
3. Бояршинов М.Г., Балабанов Д.С. Вычислительное моделирование движения сжимаемой среды, генерируемой точечным источником // Вычислительная механика сплошных сред. – Пермь: ИМСС УрО РАН, 2010. – Т. 3. – N. 3. – С. 18-31.
4. Бояршинов М.Г. Решение системы уравнений Эйлера для установившегося течения идеального газа из точечного источника // Вестник Челябинского ГУ. – Челябинск: Изд-во ЧГУ, 2010. – N24 (205). – Физика. – Вып. 8. – С. 5-8.