

УДК 628.854.001.572

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЕНТИЛЯЦИИ

Дацюк Т. А., Сауц А. В., Юрманов Б. Н., Таурит В. Р.

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия (191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18, 4), e-mail: tdatsuk@mail.ru, artursauc@narod.ru.

В работе рассматриваются процессы моделирования вентиляции и рассеивания её выбросов в атмосфере. Моделирование основано на решении системы уравнений Навье – Стокса, законах сохранения массы, импульса, теплоты. Рассмотрены различные аспекты численного решения данных уравнений. Предложена система уравнений, позволяющая рассчитать значение фонового коэффициента турбулентности. Для гипозвукового приближения предложено решение совместно с приведенными в статье уравнениями гидрогазодинамики, уравнения стояния идеального реального газа и пара. Данное уравнение является модификацией уравнения Ван-дер-Ваальса и более точно учитывает размеры молекул газа или пара и их взаимодействие. На основании условия термодинамической устойчивости получено соотношение, которое позволяет исключить физически неосуществимые корни при решении уравнения относительно объёма. Производится анализ известных расчётных моделей и вычислительных пакетов гидрогазодинамики.

Ключевые слова: моделирование, вентиляция, турбулентность, уравнения тепломассопереноса, уравнение состояния, реальный газ, пар, диссипация.

MODELING OF PROCESSES OF VENTELATION

Datciuk T. A., Sauts A. V., Jurmano B. N., Taurit V. R.

Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional Education "Saint-Petersburg State University of Architecture and Construction", Saint-Petersburg, Russia (190005, Saint- Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya Street, 4), e-mail: tdatsuk@mail.ru, artursauc@narod.ru.

The work deals with the modeling of ventilation and dispersion of its emissions in the atmosphere. Simulation is based on solving a system of Navier – Stokes equations, conservation laws of mass, momentum, heat. Cover various aspects of the numerical solution of the given equations. Proposed system of equations, which allows to calculate the value of the background of the coefficient of turbulence. For hypo sonic approach proposed solution together with those given in article equations of fluid dynamics equations standing of the ideal of a real gas and steam. This equation is a modification of the equation of Van-der-Waals forces and more accurately take into account the size of the molecules of a gas or vapor and their interaction. On the basis of the terms of the thermodynamic stability of the obtained ratio, which allows to exclude physically impossible roots when solving the equation of the volume. Is performed the analysis of the known settlement models, and computational packages fluid dynamics.

Key words: modeling, ventilation, turbulence, equations of heat and mass transfer, the equation of state, the real gas, steam, dissipation.

Введение

При проектировании производственных комплексов и уникальных объектов должны быть всесторонне обоснованы вопросы, связанные с обеспечением качества воздушной среды и нормируемых параметров микроклимата. Учитывая высокую цену изготовления, монтажа и эксплуатации систем вентиляции и кондиционирования воздуха, к качеству инженерных расчетов предъявляются повышенные требования. Для выбора рациональных проектных решений в области вентиляции необходимо иметь возможность проанализировать ситуацию в целом, т.е. выявить пространственную взаимосвязь динамических процессов, происходящих внутри помещений и в атмосфере. Оценить

эффективность вентиляции, которая зависит не только от количества воздуха, подаваемого в помещение, но и от принятой схемы воздухораспределения и концентрации вредных веществ в наружном воздухе в местах расположения воздухозаборов.

Цель статьи – использование аналитических зависимостей, с помощью которых выполняются расчеты количества вредных выделений, определить размеры каналов, воздуховодов, шахт и выбор способа обработки воздуха и т.д. При этом целесообразно использовать программный продукт «Поток» с модулем «VSV». Для подготовки исходных данных необходимо наличие схем проектируемых вентиляционных систем с указанием длин участков и расходов воздуха на концевых участках. Входными данными для расчета являются описание систем вентиляции и требования, предъявляемые к ней. Используя математическое моделирование, решаются следующие вопросы:

- выбор оптимальных вариантов подачи и удаления воздуха;
- распределение параметров микроклимата по объему помещений;
- оценка аэродинамического режима застройки;
- выбор мест для воздухозабора и удаления воздуха.

Поля скорости, давления, температуры, концентраций в помещении и атмосфере формируются под действием множества факторов, совокупность которых учесть в инженерных методах расчета достаточно сложно без применения ЭВМ.

Применение математического моделирования в задачах вентиляции и аэродинамики основано на решении системы уравнений Навье – Стокса.

Для моделирования турбулентных потоков необходимо решать систему уравнений сохранения массы и Рейнольдса (сохранения импульса):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_j} (\rho u_j) = s_m; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial X} + s_i; \quad (2)$$

где t – время, $X=X_{i,j,k}$ – пространственные координаты, $u=u_{i,j,k}$ – компоненты вектора скорости, p – пьезометрическое давление, ρ – плотность, τ_{ij} – компоненты тензора напряжений, s_m – источник массы, s_i – компоненты источника импульса.

Тензор напряжений выражается в виде:

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial X_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u'_i u'_j}; \quad (3)$$

где s_{ij} – тензор скоростей деформации; δ_{ij} – тензор дополнительных напряжений, возникающих из-за наличия турбулентности.

Для получения информации о полях температуры T и концентрации c вредных веществ система дополняется следующими уравнениями:

уравнение сохранения количества тепла

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_j} (\rho C_p T u_j) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial X_j} - \rho C_p \overline{u_j' T'} \right]; \quad (4)$$

уравнение сохранения пассивной примеси c

$$\frac{\partial \rho c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X} (\rho c u_j) = \frac{\partial}{\partial X} \left[\rho D \frac{\partial c}{\partial X} - \rho \overline{u_j' c'} \right]; \quad (5)$$

где C_p – коэффициент теплоёмкости, λ – коэффициент теплопроводности, $k = k_{i,j,k}$ – коэффициент турбулентности.

Базовый коэффициент турбулентности $k_{\text{баз}}$ определяется с помощью системы уравнений:

$$k_{\text{баз}} = \begin{cases} k_{\phi} + \frac{\varepsilon \Delta^2}{\sqrt{2}} |Def| \sqrt{1-Ri}, & Ri < 1 \\ k_{\phi}, & Ri \geq 1 \end{cases}; \quad (6)$$

где k_{ϕ} – фоновый коэффициент турбулентности, $k_{\phi} = 1-15 \text{ м}^2/\text{с}$; $\varepsilon = 0,1-04$; $\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$.

Коэффициенты турбулентности определяются с помощью уравнений:

$$\begin{cases} k_i = k_j = \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta^2} k_{\text{баз}} \\ k_k = \left(\frac{\Delta z}{\Delta} \right)^2 k_{\text{баз}} \end{cases}. \quad (7)$$

На открытой территории при малой диссипации значение k_z определяется по уравнению:

$$k_k = k_0 z / z_0; \quad (8)$$

где k_0 – значение k_k на высоте z_0 ($k_0 = 0,1 \text{ м}^2/\text{с}$ при $z_0 = 2 \text{ м}$).

На открытой площадке профиль скоростей ветра не деформирован, т.е.

При неизвестной стратификации атмосферной на открытой площадке профиль скоростей ветра можно определить:

$$u = u_0 \left(z / z_0 \right)^B; \quad (9)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial x} = 0. \quad (10)$$

где z_0 – заданная высота (высота флюгера); u_0 – скорость ветра на высоте z_0 ; $B = 0,15$.

При соблюдении условия (10) локальный критерий Ричардсона Ri определяется как:

$$Ri_{\text{откр}} = g \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{T(x, y, z, t)}{T_{\phi}(z)} + \gamma_{\phi}(z) - \gamma_a \right) / \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2. \quad (11)$$

Продифференцируем уравнение (9), приравняем уравнения (7) и (8), откуда выразим

$k_{\text{баз}}$

$$k_{\text{газ}} = \left(\frac{\Delta}{\Delta z} \right)^2 \frac{k_0 z}{z_0} = 0,05 \left(\frac{\Delta}{\Delta z} \right)^2 z. \quad (12)$$

Приравняем уравнение (12) с уравнениями системы (6). В полученное равенство подставим (11) и (9), в окончательном виде получим систему уравнений:

$$k_{\phi} = \begin{cases} 0,05z \left(\frac{\Delta}{\Delta z} \right)^2 - \frac{\epsilon \Delta^2}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{0,3u_0^2}{z_0^{0,3}} z^{-1,7} - g} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{T(x, y, z, t)}{T_{\phi}(z)} + \gamma_{\phi}(z) - \gamma_a \right); Ri < 1 \\ 0,05z \left(\frac{\Delta}{\Delta z} \right)^2; Ri \geq 1 \end{cases}. \quad (13)$$

Пульсационный член $\overline{u'_i u'_j}$, следуя идеям Буссинеска, представляется в виде:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = 2\mu_t s_{ij} - \frac{2}{3}\mu_t \left(\frac{\partial u_k}{\partial X_k} + \rho k \right) \delta_{ij}; \quad (14)$$

где μ_t – турбулентная вязкость, а дополнительные члены в уравнениях переноса энергии и компоненты примеси моделируются следующим образом:

$$-\overline{\rho u'_i c'} = \frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial c}{\partial X_i}; \quad (15)$$

$$-\rho C_p \overline{u'_i T'} = C_p \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial X_i}. \quad (16)$$

Замыкание системы уравнений происходит с помощью одной из моделей турбулентности, описанных ниже.

Для турбулентных потоков, изучаемых в вентиляционной практике, целесообразно использовать или гипотезу Буссинеска о малости изменений плотности, или так называемое «гипозвуковое» приближение. Напряжения Рейнольдса считаются пропорциональными осредненным по времени скоростям деформаций. Вводится коэффициент турбулентной вязкости $\mu^{tur} \equiv \rho \nu^{tur}$, данная концепция выражается как:

$$\tau_{kn}^{tur} \equiv -\overline{\rho u'_k u'_n} \equiv \mu^{tur} \left(\frac{\partial u_n}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_n} \right) - \frac{2}{3} \delta_{kn} k. \quad (17)$$

Коэффициент эффективной вязкости вычисляется как сумма молекулярного и турбулентного коэффициентов:

$$\mu = \mu^{eff} = \mu^{mol} + \mu^{tur}. \quad (18)$$

«Гипозвуковое» приближение предполагает решение совместно с приведенными выше уравнениями уравнения стояния идеального газа:

$$\rho = p/(RT) \quad (19)$$

где p – давление в окружающей среде; R – газовая постоянная.

Для более точных расчётов плотность примеси можно определить, используя модифицированное уравнение Ван-дер-Ваальса для реальных газов и паров

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b') = NRT^M; \quad (20)$$

где константы N и M – учитывают ассоциацию/диссоциацию молекул газа или пара; a – учитывает прочее взаимодействие; b' – учитывающая размеры молекул газа; $v=1/\rho$.

Выделяя из уравнения (12) давление p и дифференцируя его по объёму (учёт термодинамической устойчивости) получится следующее соотношение:

$$\begin{cases} v > 0 \\ 2a(v - b')^2 - nRT^M v^3 < 0 \end{cases} \quad (21)$$

Такой подход позволяет значительно сократить время расчетов по сравнению со случаем использования полных уравнений для сжимаемого газа без снижения точности полученных результатов. Аналитического решения приведенных выше уравнений не существует. В связи с этим используются численные методы.

Для решения вентиляционных задач, связанных с переносом турбулентным потоком скалярных субстанций, при решении дифференциальных уравнений используют схему расщепления по физическим процессам. Согласно принципам расщепления конечно-разностное интегрирование уравнений гидродинамики и конвективно-диффузного переноса скалярной субстанции на каждом шаге по времени Δt осуществляется в два этапа. На первом этапе рассчитываются гидродинамические параметры. На втором этапе на основе рассчитанных гидродинамических полей решаются уравнения диффузии.

Влияние переноса тепла на формирование поля скоростей воздуха учитывается с помощью приближения Буссинеска: в уравнение движения для вертикальной компоненты скорости вводится дополнительный член, учитывающий силы плавучести.

Для решения задач турбулентного движения жидкости известно четыре подхода:

- прямое моделирование «DNS» (решение нестационарных уравнений Навье – Стокса);
- решение осредненных уравнений Рейнольдса «RANS», система которых, однако, незамкнута и нуждается в дополнительных замыкающих соотношениях;
- метод крупных вихрей «LES», который основан на решении нестационарных уравнений Навье – Стокса с параметризацией вихрей подсеточного масштаба;
- метод «DES», который является комбинацией двух методов: в зоне отрывных течений – «LES», а в области «гладкого» потока – «RANS».

Наиболее привлекательным с точки зрения точности получаемых результатов, бесспорно, является метод прямого численного моделирования. Однако в настоящее время возможности вычислительной техники еще не позволяют решать задачи с реальными геометрией и числами Re , и с разрешением вихрей всех размеров. Поэтому при решении широкого спектра инженерных задач применяют численные решения уравнений Рейнольдса.

В настоящее время успешно применяются для моделирования задач вентиляции сертифицированные пакеты, такие как «STAR-CD», «FLUENT» или «ANSYS/FLOTRAN». При правильно сформулированной задаче и рациональном алгоритме решения получаемый объем информации позволяет на стадии проектирования выбрать оптимальный вариант, но выполнение расчетов с использованием данных программ требует соответствующей подготовки, и некорректное их использование может привести к ошибочным результатам.

В качестве «базового варианта» можно рассматривать результаты общепризнанных балансовых методов расчета, которые позволяют сравнить интегральные величины, характерные для рассматриваемой задачи.

Одним из важных моментов при использовании универсальных программных комплексов для решения задач вентиляции является выбор модели турбулентности. К настоящему времени известно большое количество различных моделей турбулентности, которые применяются для замыкания уравнений Рейнольдса. Модели турбулентности классифицируются по числу параметров для характеристик турбулентности, соответственно однопараметрические, двух- и трехпараметрические.

Большинство полуэмпирических моделей турбулентности, так или иначе, используют «гипотезу локальности механизма турбулентного переноса», согласно которой механизм турбулентного переноса импульса полностью определяется заданием локальных производных от осредненных скоростей и физических свойств жидкости. Влияние процессов, происходящих вдали от рассматриваемой точки, данная гипотеза не учитывает.

Наиболее простыми являются однопараметрические модели, использующие концепцию турбулентной вязкости « ν_t », а турбулентность предполагается изотропной. Модифицированный вариант модели « ν_t -92» рекомендуется при моделировании струйных и отрывных течений. Хорошее совпадение с результатами эксперимента дает также однопараметрическая модель «S-A» (Спаларта – Альмараса), которая содержит уравнение переноса для величины $\tilde{\nu}$.

Недостаток моделей с одним уравнением переноса связан с тем, что в них отсутствует информация о распределении масштаба турбулентности L . На величину L оказывают влияние процессы переноса, способы формирования турбулентности, диссипация турбулентной энергии. Универсальной зависимости для определения L не существует. Уравнение для масштаба турбулентности L часто оказывается именно тем уравнением, которое определяет точность модели и, соответственно, область её применимости. В основном область применения этих моделей ограничивается относительно простыми сдвиговыми течениями.

В двухпараметрических моделях, кроме масштаба турбулентности L , используют в качестве второго параметра скорость диссипации турбулентной энергии. Такие модели наиболее часто используются в современной вычислительной практике и содержат уравнения переноса энергии турбулентности и диссипации энергии.

Хорошо известна модель, включающая уравнения для переноса энергии турбулентности k и скорости диссипации турбулентной энергии ϵ . Модели типа « k - ϵ » могут использоваться как для пристеночных течений, так и для более сложных отрывных течений.

Двухпараметрические модели используются в низко- и высокорейнольдсовой версии. В первой – механизм взаимодействия молекулярного и турбулентного переноса вблизи твердой поверхности учитывается непосредственно. В высокорейнольдсовой версии механизм турбулентного переноса вблизи твердой границы описывается специальными пристеночными функциями, которые связывают параметры потока с расстоянием до стенки.

В настоящее время к числу наиболее перспективных относят модели «SSG» и «Gibson-Lauder», где используется нелинейная связь тензора турбулентных напряжений Рейнольдса и тензора осредненных скоростей деформаций. Они разрабатывались для улучшения прогнозирования отрывных течений. Поскольку в них рассчитываются все компоненты тензоров, они требуют больших компьютерных ресурсов по сравнению с двухпараметрическими моделями.

Для сложных отрывных течений некоторые преимущества выявило применение однопараметрических моделей « v_t -92», «S-A» по точности предсказания параметров течения и по скорости счета по сравнению с двухпараметрическими моделями.

Например, в программе «STAR-CD» предусмотрено использование моделей типа « k - ϵ », Спаларта – Альмараса, «SSG», «Gibson-Lauder», а также метод крупных вихрей «LES», и метод «DES». Два последних метода лучше подходят для расчета движения воздуха в условиях сложной геометрии, где будут возникать многочисленные отрывные вихревые области, но они требуют больших вычислительных ресурсов.

Результаты расчетов значительно зависят от выбора расчетной сетки. В настоящее время используются специальные программы для построения сеток. Ячейки сетки могут иметь разную форму и размеры, наилучшим образом подходящие для решения конкретной задачи. Наиболее простой вид сетки, когда ячейки одинаковы и имеют кубическую или прямоугольную форму. Универсальные вычислительные программы, применяемые сейчас в инженерной практике, позволяют работать на произвольных неструктурированных сетках.

Для выполнения расчетов численного моделирования задач вентиляции необходимо задание граничных и начальных условий, т.е. значений зависимых переменных или их нормальных градиентов на границах расчетной области.

Задание с достаточной степенью точности геометрических особенностей исследуемого объекта. Для этих целей можно рекомендовать для построения трехмерных моделей такие пакеты, как «SolidWorks», «Pro/Engineer», «NX Nastran». При построении расчетной сетки количество ячеек выбирается так, чтобы получить достоверное решение при минимальном времени расчета. Выбрать следует одну из полуэмпирических моделей турбулентности, являющейся наиболее эффективной для рассматриваемого течения.

В заключение добавим, что необходимо хорошее понимание качественной стороны происходящих процессов, чтобы корректно сформулировать граничные условия задачи и оценить достоверность результатов. Моделирование вентиляционных выбросов на стадии проектирования объектов можно рассматривать как один из аспектов информационного моделирования, направленного на обеспечение экологической безопасности объекта.

Список литературы

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
2. Беляев Н. Н. Моделирование процесса рассеивания токсичного газа в условиях застройки // Вестник ДИИТ. – 2009. – № 26 – С. 83-85.
3. Бызова Н. Л. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси / Н. Л. Бызова, Е. К. Гаргер, В. Н. Иванов. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 351 с.
4. Дацюк Т. А. Моделирование рассеивания вентиляционных выбросов. – СПб: СПбГАСУ, 2000. – 210 с.
5. Сауц А. В. Применение алгоритмов когнитивной графики и методов математического анализа для изучения термодинамических свойств изобутана R660A на линии насыщения: Грант № 2С/10: отчет о НИР (заключит.) / ГОУВПО СПбГАСУ; рук. Горохов В.Л., исп.: Сауц А.В.– СПб, 2011.- 30 с.: ил.– Библиогр.: с. 30.– №ГР 01201067977.–Индв. №02201158567.

Рецензенты:

Воликов Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и охраны воздушного бассейна, ФГБОУ ВПОУ «СПбГАСУ», г. Санкт-Петербург.

Полушкин Виталий Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, ФГБОУ ВПО «СПбГАСУ», г. Санкт-Петербург.