для переноса среднеквадратичных колебаний завихренности.

Уравнения реальной k–ε модели имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k\overline{u}_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon\overline{u}_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+\rho C_1 S\varepsilon- \\ -\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\nu\varepsilon}}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b+S_\varepsilon. \end{cases}$$

В реальной модели нахождение турбулентной вязкости существенно отличается от других k–ε моделей.

$$C_\mu=\frac{1}{A_0+A_S\frac{kU^*}{\varepsilon}},$$

Литература

1. Белов И.А. Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений: учеб. пособие / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2001. – 108 с.
2. Durbin P.A., Reif B.A.P. Statical theory and modeling for turbulent flows. - John Wiley and Sons, West Sussex, United Kingdom, 2011. – 357 p.
3. Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. – London: Academic Press, 1972. – 169 p.
4. Renormalization group modeling and turbulence simulations / S.A. Orszag, V. Yakhot, W.S. Flannery, F. Boysan, D. Choudhury, J. Maruzewski, B. Patel // International conference on near-wall turbulent flows, Tempe, Arizona, 1993.
5. A new k-ε eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows - Model development and validation / T.–H. Shih, W.W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, J. Zhu // Computers fluids. – 1995. – No. 24 (3). – P. 227-238.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ НА ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

С.П. Красуцкий, Н.А Букин

Научный руководитель - доктор ф.-м.н., С.Н. Харламов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Моделирование образования гидратов на внутренней поверхности трубы

Для численного моделирования образования газовых гидратов, образующихся на поверхности трубы , будет использоваться итерационно-интерполяционный метод.

Постановка задачи об образовании гидратов на внутренней поверхности трубы

Будем рассматривать сечение круглой трубы, на внешней поверхности которой происходит теплообмен с окружающей средой, а внутренняя поверхность обтекается потоком газа, содержащем водяной пар. Процесс образования гидратов будем считать равновесным и моделировать как фазовый переход 1-го рода (происходит при постоянной температуре, определяемой по кривой фазового равновесия). Все теплофизические параметры задачи будем считать постоянными. Таким образом, образование гидратов идет только за счет охлаждения трубы. Процессы теплообмена в стенке трубы и слое гидрата будем описывать уравнением теплопроводности с постоянными коэффициентами, записанным в цилиндрической системе координат:

$$r\frac{\partial T}{\partial t}+rv_r\frac{\partial T}{\partial r}=\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{r\lambda}{\rho c_p}\frac{\partial T}{\partial r}\right) \tag{1}$$

где r - время, r - радиальная координата, отсчитываемая от оси трубы, λ - коэффициент теплопроводности, ρ - плотность, c_p - удельная теплоемкость, T - температура, v_r - скорость движения среды.

В начальный момент времени температура стенки полагается постоянной и равной температуре газового потока.

$$T_{t=0}=T_0\,. \tag{2}$$

На внешней поверхности трубы выставляются граничные условия 1-3 рода, записанные в обобщенном виде:

$$\alpha_w\left(r\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\beta_w T\bigg|_{r=r_w}=f_w\,. \tag{3}$$

В частности, если трубопровод находится в грунте, то выставляется граничное условие 1-го рода:

$$\alpha_w = 0, \quad \beta_w = 1, \quad f_w = T_w. \tag{4}$$

На границе контакта «труба – слой гидратов» выставляются условия сопряжения (равенство тепловых потоков и температур):

$$\lambda_i \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=x_i-0} = \lambda_{i+1} \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=x_i+0},$$
$$\left.T\right|_{x=x_i-0} = \left.T\right|_{x=x_i+0}, \; i = \overline{1, N-1}. \tag{5}$$

На поверхности слоя гидратов задается условие 1-го рода, а скорость движения границы слоя гидратов определяется из соотношения Стефана:

$$\left.T\right|_{r=r_e} = T_e,$$
$$v_g = -\frac{\lambda_g}{\rho_g Q_g} \left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=r_e}, \tag{6}$$

где $v_g, \lambda_g, \rho_g Q_g$ - линейная скорость гидратообразования, коэффициент теплопроводности гидратов, плотность гидратов, удельная теплота гидратообразования. Индексы «w», «e» отвечают внешней поверхности трубы и внутренней поверхности слоя гидратов.

Данная задача решалась численно итерационно-интерполяционным методом. Приведем разностную схему, применявшуюся в расчетах.

Запишем исходные уравнения и граничные условия в общем виде:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(a_1 \frac{\partial F}{\partial x}\right) = -a_2 \frac{\partial F}{\partial x} + a_4 + a_6 \frac{\partial F}{\partial t},$$
$$\alpha_w \left(a_1 \frac{\partial F}{\partial x}\right) + \beta_w F \Big|_{x=x_w} = f_w,$$
$$\alpha_0 \left(a_1 \frac{\partial F}{\partial x}\right) + \beta_0 F \Big|_{x=0} = f_0. \tag{7}$$

Разобьем область решения [0, x_w] неравномерной сеткой на N отрезков, так чтобы узлы сетки совпадали с местами контактов слоев. На i-ом интервале с шагом $h_i=x_i-x_{i-1}$ искомую функцию F и коэффициенты a_i представим в виде многочлена 1-ой степени. Проинтегрировав в подобном узле уравнение (7) по x влево и вправо от узла и усредняя коэффициент при конвективном члене как сумму удвоенного значения в узле и соседней точке, поделенную на три, получим следующие выражения для потоков в i-ом узле сетки слева и справа:

$$a_1 \left.\frac{\partial F}{\partial x}\right|_{x=x_i-0} = (F_i - F_{i-1})\left[\frac{\underline{a}_{1,i} + a_{1,i-1}}{2h_i} - \frac{a_{2,i-1} + 2\underline{a}_{2,i}}{6}\right] + \frac{h_i \underline{a}_{4,i}}{2} + \frac{h_i \underline{a}_{6,i}}{2}\frac{(F_i - F_{i,t})}{\tau},$$
$$a_1 \left.\frac{\partial F}{\partial x}\right|_{x=x_i+0} = (F_{i+1} - F_i)\left[\frac{a_{1,i+1} + \overline{a}_{1,i}}{2h_{i+1}} + \frac{a_{2,i+1} + 2\overline{a}_{2,i}}{6}\right] - \frac{h_{i+1}\overline{a}_{4,i}}{2} - \frac{h_{i+1}\overline{a}_{6,i}}{2}\frac{(F_i - F_{i,t})}{\tau} \tag{8}$$

где τ - шаг по времени, нижний индекс t – означает значение на предыдущем слое по времени, черта снизу соответствует значению слева от узла, черта сверху - справа.

Приравнивая потоки в узлах сетки, получим следующую систему линейных алгебраических уравнений:

$$A_i F_{i-1} - C_i F_i + B_i F_{i+1} = -D_i, \qquad i = \overline{1, N-1},$$
$$A_i = \tau[h_{i+1}(\underline{a}_{1,i} + a_{1,i-1}) - \beta_i(2\underline{a}_{2,i} + a_{2,i-1})],$$
$$B_i = \tau[h_i \; (\overline{a}_{1,i} + a_{1,i+1}) - \beta_i(2\overline{a}_{2,i} + a_{2,i+1})],$$
$$C_i = A_i + B_i + \frac{(\overline{a}_{6,i} + \underline{a}_{6,i})}{2}\gamma_i,$$
$$D_i = \gamma_i\left[\frac{(\overline{a}_{6,i} + \underline{a}_{6,i})}{2}F_{i,t} - \tau\frac{(\overline{a}_{4,i} + \underline{a}_{4,i})}{2}\right], \tag{9}$$
$$S_6 = \frac{(\overline{a}_{6,i} + \underline{a}_{6,i})}{2}\gamma_i, S_4 = \frac{(\overline{a}_{4,i} + \underline{a}_{4,i})}{2}\gamma_i,$$
$$C_i = A_i + B_i + S_6,$$
$$D_i = S_6 F_{i,t} - \tau S_4,$$
$$\beta_i = \frac{h_i h_{i+1}}{3}, \quad \gamma_i = h_i h_{i+1}(h_i + h_{i+1}).$$

Таким образом, исходная задача (7) сводится к системе алгебраических уравнений (9), . Данная система имеет трехдиагональную матрицу и может быть решена методом скалярной прогонки. На первом этапе вычисляются прогоночные коэффициенты:

$$\begin{aligned} &M_N = A_N / C_N, \\ &P_N = D_N / C_N, \\ &M_i = A_i /(C_i - B_i M_{i+1}), \\ &P_i = (B_i P_{i+1} + D_i)/(C_i - B_i M_{i+1}), \quad i = \overline{N-1,1}, \end{aligned} \tag{10}$$

на втором этапе вычисляются значение функции в узлах сетки:

$$\begin{aligned} &F_0 = (B_0 P_1 + D_0)/(C_0 - B_0 M_1), \\ &F_i = M_i F_{i-1} + P_i, \quad i = \overline{1,N}. \end{aligned} \tag{11}$$

Так как скорость движения границы слоя гидратов заранее не известна, то использовались итерации на каждом временном слое. Условие сходимости имело вид:

$$\left| \frac{T^k - T^{k-1}}{T^k} \right| < \varepsilon \tag{12}$$

где k - номер итерации, ε - относительная точность.

Литература

1. Гришин А.М., Зинченко В.И., Ефимов К.Н., Суботин А.Н., Якимов А.С. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. – Томск: Изд-во Том. Ун-та., 2004. – 318 с.
2. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
3. Шагапов В.П., Урзанов Р.Р., Мускаев Н.Г. Математическое моделирование течения углеводородного газа в трубопроводе с учетом гидратообразования на стенках трубы. – Вестник УГАТУ, 2011 Т. 15, № 4 (44). 164–168 с.
4. Юдаев Б.Н. Теплопередача. М.: «Высшая школа», 1973. – 360 с.

ПОДГОТОВКА ГАЗА НА ПРОМЫСЛЕ. СХЕМА ОЧИСТКИ ОТ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

А.Г. Кугданов, Н.Е. Федоров

Научный руководитель профессор кафедры ТХНГ ИПР, доктор ф.-м. наук С.Н. Харламов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г.Томск, Россия

При выборе методик очистки газов нужно тщательнее подходить к оценке химического состава сырья, включая примеси, которые не регламентируются в товарном газе и продуктах его переработки или не оказывают влияния на их качество из-за незначительного содержания в исходном газе. Это обоснована в частности тем, что при взаимодействии примесей с некоторыми растворителями могут образоваться такие химические соединения, которые при нагревании их в процессе регенерации не распадаются на составные части, в результате чего концентрация активной части растворителя постепенно уменьшается, растворитель дезактивируется и приходит в негодность.

В данной статье рассматриваются массообменные процессы и технологические установки очистки газов от сероводорода и диоксида углерода

Ставится задача рассмотреть математическое моделирование процесса ректификации.

Массообменные процессы.

Массопередача - процесс переноса одного или нескольких веществ из одной фазы в другую в направлении достижения равновесия, используется для разделения гомогенных и гетерогенных систем.

Классификация процессов массопередачи.

I. По назначению:

1. Абсорбция – процесс поглощения компонента из паровой или газовой фазы жидким поглотителем (абсорбентом);

2. Перегонка – процесс разделения гомогенных жидких смесей на компоненты путем однократного или многократного (ректификация) взаимодействия между паровой и жидкой фазами, движущимися противотоком;

3. Экстракция (жидкостная) – процесс извлечения вещества из растворов с помощью избирательных растворителей (экстрагентов);

4. Адсорбция – процесс поглощения компонента из паровой, газовой либо жидкой фаз твердым пористым поглотителем (адсорбентом);