щелочного (ПАВ) заводнения. Компоненты, при их корректном подборе, могут значительно повысить технико-экономическую эффективность процесса заводнения. Для реализации положительного эффекта от применения технологии необходима организация участка опытно-промышленных работ на пласте ПК_{1,3} ВММ.

Библиографический список

1. Юбов Ф. Т., Севастьянов А. А. Оценка перспектив применения методов увеличения нефтеотдачи на ранней стадии разработки залежей нефти ПК_{1,3} Восточно-Мессояхского месторождения // Приоритетные научные направления: от теории к практике. Сб. тр. XXXIV Междунар. науч.-практ. конф. – Ч. 1. – Новосибирск, 2016. – С. 217–225.
2. Алмаев Р. Х. Применение композиций полимеров и НПАВ для вытеснения нефти // Нефтяное хозяйство. – 1993. – № 12. – С. 22–24.

Сведения об авторах

Юбов Феликс Тофикович, начальник отдела, АО «Мессояхнефтегаз», г. Тюмень, тел. 8(3452)522190, e-mail: Eyubov.FT@tmn.gazprom-neft.ru

Сохосико Сергей Константинович, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)283027, e-mail: sksohoshko@mail.ru

Севастьянов Алексей Александрович, к. т. н., доцент, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)283027

Коваленко Игорь Викторович, к. т. н., начальник отдела, ООО «Газпромнефть – НТЦ», г. Тюмень, e-mail: Kovalenko.IV@gazpromneft-ntc.ru

Information about the authors

Eyubov F. T., Head of the Department, JSC «Messoyakhneftegaz», Tyumen, phone: 8(3452)522190, e-mail: Eyubov.FT@tmn.gazprom-neft.ru

Sokhoshko S. K., Doctor of Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)283027, e-mail: sksohoshko@mail.ru

Sevastyanov A. A., Candidate of Engineering, Associate Professor, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)283027

Kovalenko I. V., Candidate of Technical Sciences, Head of the Department, LLC «Gazpromneft–NTC», Tyumen, e-mail: Kovalenko.IV@gazpromneft-ntc.ru

Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

УДК 519.63+533.6

УРАВНЕНИЕ ЭНЕРГИИ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ ДИССИПАЦИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ EQUATION OF ENERGY WITH ALLOWANCE OF EFFECTS OF DISSIPATION IN CYLINDRICAL COORDINATE SYSTEM

Н. В. Нестерович, А. Г. Обухов

N. V. Nesterovich, A. G. Obukhov

*Тюменский государственный университет, г. Тюмень
Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень*

*Ключевые слова: полная система уравнений Навье — Стокса; диссипация энергии;
частные производные; цилиндрическая система координат*

*Key words: complete system of Navier-Stokes equations; energy dissipation;
partial derivatives; cylindrical coordinate system*

Исследование трехмерных нестационарных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа обычно проводится с использованием модели сжимаемой сплошной среды, которая основывается на численном решении полной системы уравнений Навье — Стокса [1–8]. Эта модель более адекватно описывает физические процессы течений газа в восходящих закрученных потоках под действием сил тяжести и Кориолиса, поскольку учитывает диссипацию энергии.

Полная система уравнений Навье — Стокса в безразмерных переменных в скалярной форме имеет вид [2]

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_t + u\rho_x + v\rho_y + w\rho_z + \rho(u_x + v_y + w_z) = 0, \\ u_t + uu_x + vu_y + wu_z + \frac{T}{\gamma\rho}\rho_x + \frac{1}{\gamma}T_x = av - bw + \\ + \frac{\mu_0}{\rho}\left(u_{xx} + \frac{3}{4}u_{yy} + \frac{3}{4}u_{zz} + \frac{1}{4}v_{xy} + \frac{1}{4}w_{xz}\right), \\ v_t + uv_x + vv_y + wv_z + \frac{T}{\gamma\rho}\rho_y + \frac{1}{\gamma}T_y = -au + \\ + \frac{\mu_0}{\rho}\left(\frac{3}{4}v_{xx} + v_{yy} + \frac{3}{4}v_{zz} + \frac{1}{4}u_{xy} + \frac{1}{4}w_{yz}\right), \\ w_t + uw_x + vw_y + ww_z + \frac{T}{\gamma\rho}\rho_z + \frac{1}{\gamma}T_z = bu - g + \\ + \frac{\mu_0}{\rho}\left(\frac{3}{4}w_{xx} + \frac{3}{4}w_{yy} + w_{zz} + \frac{1}{4}u_{xz} + \frac{1}{4}v_{yz}\right), \\ T_t + uT_x + vT_y + wT_z + (\gamma - 1)T(u_x + v_y + w_z) = \\ = \frac{\kappa_0}{\rho}(T_{xx} + T_{yy} + T_{zz}) + \\ + \frac{\mu_0\gamma(\gamma - 1)}{2\rho}\{[(u_x - v_y)^2 + (u_x - w_z)^2 + (v_y - w_z)^2] + \\ + \frac{3}{2}[(u_y + v_x)^2 + (u_z + w_x)^2 + (v_z + w_y)^2]\}. \end{array} \right. \quad (1)$$

В системе (1): t — время; x, y, z — декартовы координаты; ρ — плотность газа; μ_0 и κ_0 — постоянные значения безразмерных коэффициентов вязкости и теплопроводности; $\vec{V} = (u, v, w)$ — вектор скорости газа с проекциями на соответствующие декартовы оси; T — температура газа; $\vec{g} = (0, 0, -g)$ — вектор ускорения силы тяжести; $\gamma = 1,4$ — показатель политропы для воздуха; $-2\vec{\Omega} \times \vec{V} = (av - bw, -au, bu)$ — вектор ускорения силы Кориолиса, где $a = 2\Omega \sin \psi$, $b = 2\Omega \cos \psi$, $\Omega = |\vec{\Omega}|$; $\vec{\Omega}$ — вектор угловой скорости вращения Земли; ψ — широта точки O — начала декартовой системы координат $Oxyz$, вращающейся вместе с Землей.

Численное решение полной системы уравнений Навье — Стокса при описании сложных течений газа часто приводит к осевой симметрии распределения газодинамических характеристик. Поэтому для проведения численных расчетов целесообразно использовать цилиндрическую систему координат. В данной работе преобразуем пятое уравнение системы (1) для записи его в цилиндрической системе координат

$$\begin{aligned} T_t + uT_x + vT_y + wT_z + (\gamma - 1)T(u_x + v_y + w_z) &= \frac{\kappa_0}{\rho}(T_{xx} + T_{yy} + T_{zz}) + \\ &+ \frac{\mu_0\gamma(\gamma - 1)}{2\rho}\{[(u_x - v_y)^2 + (u_x - w_z)^2 + (v_y - w_z)^2] + \\ &+ \frac{3}{2}[(u_y + v_x)^2 + (u_z + w_x)^2 + (v_z + w_y)^2]\}. \end{aligned} \quad (2)$$

В работе [9] в качестве компонент вектора скорости газа в цилиндрической системе координат r, φ, z вместо u, v введены соответственно ζ — радиальная и η — окружная компоненты по формулам

$$u = \zeta \cos \varphi - \eta \sin \varphi; \quad v = \zeta \sin \varphi + \eta \cos \varphi. \quad (3)$$

Частные производные первого порядка по пространственным переменным преобразовываются следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial x} = \cos \varphi \frac{\partial}{\partial r} - \frac{\sin \varphi}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi}; \quad \frac{\partial}{\partial y} = \sin \varphi \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\cos \varphi}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi}. \quad (4)$$

Производные по независимой переменной z при переходе к цилиндрическим координатам не меняются. Частные производные второго порядка по пространственным переменным преобразуются по формулам

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x^2} = & \left(\cos \varphi \frac{\partial}{\partial r} - \frac{\sin \varphi}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \right) \left(\cos \varphi \frac{\partial}{\partial r} - \frac{\sin \varphi}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \right) = \cos^2 \varphi \frac{\partial^2}{\partial r^2} - \\ & - \frac{2 \sin \varphi \cos \varphi}{r} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \varphi} + \frac{\sin^2 \varphi}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{2 \sin \varphi \cos \varphi}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial y^2} = & \left(\sin \varphi \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\cos \varphi}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \right) \left(\sin \varphi \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\cos \varphi}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \right) = \sin^2 \varphi \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \\ & + \frac{2 \sin \varphi \cos \varphi}{r} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \varphi} + \frac{\cos^2 \varphi}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\cos^2 \varphi}{r} \frac{\partial}{\partial r} - \frac{2 \sin \varphi \cos \varphi}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi}. \end{aligned} \quad (6)$$

С учетом соотношений (3)–(6) левая часть уравнения (2) преобразуется

$$\begin{aligned} T_t + uT_x + vT_y + wT_z + (\gamma - 1)T(u_x + v_y + w_z) = \\ = T_t + \zeta T_r + \frac{\eta}{r} T_\varphi + wT_z + (\gamma - 1)T \left(\zeta_r + \frac{\zeta}{r} + \frac{1}{r} \eta_\varphi + w_z \right), \end{aligned} \quad (7)$$

а отдельные слагаемые правой части пятого уравнения системы (1) преобразуются следующим образом:

$$\frac{\kappa_0}{\rho} (T_{xx} + T_{yy} + T_{zz}) = \frac{\kappa_0}{\rho} \left(T_{rr} + \frac{1}{r^2} T_{\varphi\varphi} + T_{zz} + \frac{1}{r} T_r \right); \quad (8)$$

$$u_x - v_y = \cos 2\varphi \left(\zeta_r - \frac{1}{r} \eta_\varphi - \frac{1}{r} \zeta \right) - \sin 2\varphi \left(\eta_r + \frac{1}{r} \zeta_\varphi - \frac{1}{r} \eta \right); \quad (9)$$

$$\begin{aligned} u_x - w_z = & \cos^2 \varphi \zeta_r - \sin \varphi \cos \varphi \eta_r - \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{r} \zeta_\varphi + \\ & + \frac{\sin^2 \varphi}{r} \eta_\varphi + \frac{\sin^2 \varphi}{r} \zeta + \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{r} \eta - w_z; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} v_y - w_z = & \sin^2 \varphi \zeta_r + \sin \varphi \cos \varphi \eta_r + \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{r} \zeta_\varphi + \\ & + \frac{\cos^2 \varphi}{r} \eta_\varphi + \frac{\cos^2 \varphi}{r} \zeta - \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{r} \eta - w_z; \end{aligned} \quad (11)$$

$$u_y + v_x = \sin 2\varphi \left(\zeta_r - \frac{1}{r} \eta_\varphi - \frac{1}{r} \zeta \right) + \cos 2\varphi \left(\eta_r + \frac{1}{r} \zeta_\varphi - \frac{1}{r} \eta \right); \quad (12)$$

$$u_z + w_x = \cos \varphi \zeta_z - \sin \varphi \eta_z + \cos \varphi w_r - \frac{\sin \varphi}{r} w_\varphi ; \quad (13)$$

$$v_z + w_y = \sin \varphi \zeta_z + \cos \varphi \eta_z + \sin \varphi w_r + \frac{\cos \varphi}{r} w_\varphi ; \quad (14)$$

$$(u_z + w_x)^2 + (v_z + w_y)^2 = (\zeta_z + w_r)^2 + \left(\eta_z + \frac{1}{r} w_\varphi \right)^2 ; \quad (15)$$

С учетом (8)–(15) пятое уравнение системы (1) при введении цилиндрической системы координат переходит в следующее уравнение:

$$\begin{aligned} T_t + \zeta T_r + \frac{\eta}{r} T_\varphi + w T_z + (\gamma - 1) T \left(\zeta_r + \frac{1}{r} \zeta + \frac{1}{r} \eta_\varphi + w_z \right) = \frac{\kappa_0}{\rho} \left(T_{rr} + \frac{1}{r^2} T_{\varphi\varphi} + T_{zz} + \frac{1}{r} T_r \right) + \\ + \frac{\mu_0 \gamma (\gamma - 1)}{2\rho} \left\{ \left[\cos 2\varphi \left(\zeta_r - \frac{1}{r} \eta_\varphi - \frac{1}{r} \zeta \right) - \sin 2\varphi \left(\eta_r + \frac{1}{r} \zeta_\varphi - \frac{1}{r} \eta \right) \right]^2 + \right. \\ + \left[\cos^2 \varphi \zeta_r - \sin \varphi \cos \varphi \eta_r - \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{r} \zeta_\varphi + \frac{\sin^2 \varphi}{r} \eta_\varphi + \frac{\sin^2 \varphi}{r} \zeta + \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{r} \eta - w_z \right]^2 + \\ + \left[\sin^2 \varphi \zeta_r + \sin \varphi \cos \varphi \eta_r + \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{r} \zeta_\varphi + \frac{\cos^2 \varphi}{r} \eta_\varphi + \frac{\cos^2 \varphi}{r} \zeta - \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{r} \eta - w_z \right]^2 + \\ + \frac{3}{2} \left[\sin 2\varphi \left(\zeta_r - \frac{1}{r} \eta_\varphi - \frac{1}{r} \zeta \right) + \cos 2\varphi \left(\eta_r + \frac{1}{r} \zeta_\varphi - \frac{1}{r} \eta \right) \right]^2 + \\ \left. + \frac{3}{2} \left[(\zeta_z + w_r)^2 + \left(\eta_z + \frac{1}{r} w_\varphi \right)^2 \right] \right\} . \quad (16) \end{aligned}$$

Таким образом, в данной работе проведены преобразования уравнения энергии полной системы уравнений Навье — Стокса с учетом диссипативной функции. В результате выполненных преобразований это уравнение переписано в цилиндрической системе координат, использование которой более целесообразно для описания сложных течений газа с осевой симметрией.

Библиографический список

1. Баутин С. П., Обухов А. Г. Математическое моделирование придонной части восходящего закрученного потока // Теплофизика высоких температур. – 2013. – Т. 51, № 4. – С. 567–570.
2. Разрушительные атмосферные вихри: теоремы, расчеты, эксперименты / С. П. Баутин [и др.]. – Новосибирск: Наука, Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2013. – 215 с.
3. Bautin S. P., Obukhov A. G. Mathematical Simulation of the Near-Bottom Section of an Ascending Twisting Flow // High Temperature. – 2013. – Vol. 51. – № 4. – P. 509–512.
4. Абдубакова Л. В., Обухов А. Г. Численный расчет скоростных характеристик трехмерного восходящего закрученного потока газа // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2014. – № 3. – С. 88–94.
5. Обухов А. Г., Абдубакова Л. В. Численный расчет термодинамических характеристик трехмерного восходящего закрученного потока газа // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математические науки. Информатика. – 2014. – № 7. – С. 157–165.
6. Абдубакова Л. В., Обухов А. Г. Численный расчет термодинамических параметров закрученного потока газа, инициированного холодным вертикальным продувом // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2014. – № 5 – С. 57–62.
7. Обухов А. Г., Бараникова Д. Д. Особенности течения газа в начальной стадии формирования теплового восходящего закрученного потока // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2014. – № 6 – С. 65–70.
8. Баутин С. П., Крутова И. Ю., Обухов А. Г. Закрутка огненного вихря при учете сил тяжести и Кориолиса // Теплофизика высоких температур. – 2015. – Т. 53, № 6. – С. 961–964.
9. Баутин С. П. Торнадо и сила Кориолиса. – Новосибирск: Наука. – 2008. – 96 с.

Сведения об авторах

Нестерович Наталья Викторовна, ассистент кафедры алгебры и математической логики, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, тел. 89220761450, e-mail: n.v.nesterovich@utmn.ru

Обухов Александр Геннадьевич, д. ф.-м. н., профессор кафедры бизнес-информатики и математики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89220014998, e-mail: aobukhov@tsogu.ru

Information about the authors

Nesterovich N. V., Assistant at the Department of Algebra and Mathematical Logic, Tyumen State University, phone: 89220761450, e-mail: n.v.nesterovich@utmn.ru

Obukhov A. G., Doctor of Physics and Mathematics, Professor at the Department of Business Informatics and Mathematics, Industrial University of Tyumen, phone: 89220014998, e-mail: aobukhov@tsogu.ru

Химия и технология переработки нефти и газа

УДК 665.6:66.092-977

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА PERFECTION OF THE PYROLYSIS PROCESS

Е. Р. Магарил, Р. З. Магарил, Л. В. Трушкова

E. R. Magaril, R. Z. Magaril, L. V. Trushkova

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Ключевые слова: эффективность пиролиза; относительная реакционная способность связей; водород

Key words: the effectiveness of pyrolysis; relative reactivity of chemical bond; hydrogen

Производство этилена пиролизом углеводородного сырья в 2014 году составило более 160 млн т, а пропилена — более 80 млн т, и прогнозируется, что к 2020 году мощности производства этилена превысят 200 млн т [1], и резко увеличится производство пропилена. Это повышает значимость совершенствования процесса пиролиза, который является основным источником производства низших олефинов и в значительной степени определяет потенциал нефтехимической отрасли и для многих стран — потенциал промышленного производства в целом. Даже небольшое увеличение выхода целевых продуктов, повышение селективности процесса, снижение выхода жидких продуктов конденсации при существующей динамике производства этилена и пропилена приведут к значимой экономии дефицитного углеводородного сырья, топлива и других энергоресурсов [2]. Разработка методов повышения эффективности пиролиза возможна на основе понимания механизма процесса.

Обсуждение механизма пиролиза олефинов. Типичными реакциями для пиролиза являются свободнорадикальные реакции углеводородов. Считается, что молекулярные реакции также существенны [3]. Для радикальных реакций в пиролизе при распространении цепи шаг повторяющиеся реакции, регенерирующие радикалы являются типичными. Влияние стадий инициирования и обрыва цепей на выход продукта является низким, хотя они могут существенно влиять на степень конверсии. На начальных стадиях пиролиза высок выход α -олефинов, последующие реакции которых влияют на состав конечных продуктов. Известно, что при пиролизе алканов реакции продолжения цепей обуславливаются в основном атомом водорода H и метильным радикалом CH_3 . Предположение об аналогичном