

УДК 532.1

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАБОЧИХ ЖИДКОСТЕЙ ГИДРОПРИВОДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

© 2013 С.Н. Редников, К.В. Найгерт

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Поступила в редакцию 20.03.2013

В статье выделяются характерные особенности описания математической модели теплогидравлических и химических свойств рабочих жидкостей. Авторами приводятся принципиальные аспекты построения модели рабочего процесса гидросистемы высокого давления для реальной жидкости. Особое внимание уделяется нестационарности гидродинамики системы и физико-химические процессов, протекающих в жидкой среде. Главным достоинством предлагаемой модели является возможность учета максимально возможного количества факторов, влияющих на реологический свойства исследуемой среды.

Ключевые слова: вязкость, математическая модель, теплогидравлические свойства, нестационарная гидродинамика, реология углеводородов

Изучение теплогидравлических и химических свойств рабочих жидкостей гидроприводов высокого давления затрудняется тем, что высокие давления и гидродинамические явления, возникающие в системе, потенцируют смещение химического равновесия в многокомпонентной смеси углеводородов. Рассматривая математическую модель процесса эксплуатации рабочих жидкостей в условиях высоких давлений, выделим две составляющие данной модели: динамическую систему гидропривода высокого давления и физико-химические процессы, протекающие в жидкой среде. В расчетах используем принцип равной точности при выборе точности исходных данных, способа математического описания модели и метода решения уравнений. Для упрощения, как математической модели, так и алгоритмов решения, при возможности замены идентичных агрегатов или веществ одним эквивалентным, обратимся к принципу эквивалентности.

Построение математической модели производим с учетом воспроизведения исследуемых явлений, с необходимой точностью, в некотором ограниченном диапазоне рабочих давлений. Математическое описание рабочего процесса самой гидросистемы высокого давления для реальной жидкости требует рассмотрения гидродинамики системы и теплогидравлических свойств углеводородов в заданных интервалах высоких

давлений. Уравнения описания нестационарной гидродинамики выводятся на основе законов сохранения массы, импульса и энергии и др. Запишем основные из них в общем виде. Уравнение неразрывности, выражающее собой закон сохранения массы в элементарном объеме, то есть непрерывность потока жидкости, имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho v = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} v + v \operatorname{grad} \rho = 0$$

где $\rho = \rho(x, y, z, t)$ – плотность жидкости, $v = v(x, y, z, t)$ – вектор скорости жидкости в точке с координатами (x, y, z) в момент времени t . Вектор $j = \rho v$ – плотность потока жидкости.

Уравнение диффузии применимо для нахождения зависимости концентрации вещества от пространственных координат и времени, причем задан коэффициент, в общем случае также зависящий от пространственных координат и времени, характеризующий проницаемость среды для диффузии. При решении уравнения теплопроводности, нахождения зависимости температуры среды от пространственных координат и времени, заданные теплоемкость и теплопроводность среды, также в общем случае неоднородной.

$$\frac{\partial}{\partial t} c(\vec{r}, t) = (\nabla, \operatorname{D} \nabla c(\vec{r}, t)) + f(\vec{r}, t)$$

где $c(\vec{r}, t)$ – концентрация диффундирующего вещества, $f(\vec{r}, t)$ – функция, описывающая источники вещества (тепла). $\nabla = (\partial_x, \partial_y, \partial_z)$ – оператор Набла, $a(\vec{r}, t)$ – скалярное произведение.

Редников Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент. E-mail: srednikov@mail.ru
Найгерт Катарина Валерьевна, инженер. E-mail: kathy_naigert@mail.ru

Уравнение Навье-Стокса для сжимаемой жидкости – система дифференциальных уравнений, описывающая движение вязкой жидкости с учетом напряжений и деформаций, выражающие собой закон сохранения импульса.

$$\rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left\{ \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{i,k} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\zeta \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \delta_{i,k} \right) \right\}$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, ζ – объёмная вязкость, $\delta_{i,k}$ – дельта Кронекера.

Недостатком такого подхода является неучет факторов, влияющих на вязкость вещества, либо их косвенный учет через гипотезы турбулентности. Рассмотрим факторы, влияющие на вязкость. Концентрация – с увеличением дисперсной фазы происходит рост коэффициента динамической вязкости. Температура – вязкость чувствительна к изменению температуры. Слишком высокие температуры снижают стабильность дисперсий: при повышении температуры число и энергия соударений частиц возрастают и, таким образом, тенденция системы к коагуляции также увеличивается. Степень дисперсности – дисперсность является определяющей характеристикой многих суспензий. Сольватация – процесс, связывания молекул растворителя молекулами или ионами растворённого

вещества. Электрическое напряжение – ряд веществ обладает свойствами изменять вязкость под воздействием электрических полей. История воздействия внешних факторов (термического воздействия, влияние сдвиговой предыстории на вязкость, воздействия магнитных и электрических полей) – наличие или отсутствие других лиофильных коллоидов. Присутствие электролитов и неэлектролитов – с повышением концентрации электролитов может происходить коагуляция, причём изменение концентрации может происходить и пристеночном слое локально. Скорость сдвига – изменение скорости сдвига может как снижать, так и увеличивать вязкость. Давление – при сжатии жидкости межмолекулярное взаимодействие возрастает, что и приводит к изменению сопротивления течению. Для капельных жидкостей модуль упругости возрастает с увеличением температуры и давления. Влияние давления тем больше, чем сложнее строение молекул. Кислотно-щелочной баланс – как утверждает французский ученый А. Седех, вязкость в диапазоне $pH < 5$ возрастает. Затем вязкость дисперсии постоянна во всем диапазоне pH , обычно 5-10. При $pH > 12$ вязкость водной дисперсии резко падает. Этот эффект обусловлен наличием избыточного количества ионов. Физико-химическая природа вещества, которая определяется характером жидкости и оказывает влияние на вязкость.

Интегральное соотношение, выражающее закон сохранения энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \frac{v^2}{2} \right) = - \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\left(\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right) \rho v_k - v_i \tau'_{ik} \right) - \tau'_{ik} \gamma_{ik}$$

где $\tau'_{ik} \gamma_{ik}$ – вязкая диссипация энергии внутри объема жидкой частицы.

Для получения достоверных результатов необходимо уточнение значений химических и термодинамических констант компонентов жидкой среды относительно моделируемых условий. Нелинейной динамической математической моделью гидросистемы является детерминированное описание нелинейными дифференциальными и алгебраическими уравнениями физических процессов, происходящих в гидросистеме. Так как динамическая система гидропривода высокого давления является сложной, применим агрегативный принцип построения ее математической модели. В соответствии с выбранным принципом сложные модели больших систем составляются из моделей отдельных, более простых их составляющих, которые предварительно разрабатывают независимо друг от друга, а затем сводят в единую общую модель. Для каждого

агрегата составляется своя подсистема уравнений, дающая описания изменений его рабочих параметров. В динамике проявляются и влияют на протекание процессов следующие параметры: инерция перемещаемых масс и вращающихся масс, тепловая энергия, реакция стенок магистралей и элементов конструкций, сжимаемость жидкости и т.д. Упрощая математическую модель, дискретную молекулярную структуру игнорируем, а движущуюся среду рассматриваем как континуум. Данное допущение не позволяет рассматривать частицы как носители количества движения и не отображает энергетические процессы, протекающие в жидкой среде.

Теперь рассмотрим физико-химические процессы, протекающие в исследуемой среде. На сегодняшний день хорошо зарекомендовали себя рабочие жидкости на основе базовых

компонентов нефтяного происхождения. При применении нефтепродуктов в гидравлике необходимо учитывать отклонения и свойств от поведения истинных растворов, для которых установлены закономерности (законы Дальтона, Вант-Гоффа; принципы Рауля, Ле Шателье). В условиях высоких и сверхвысоких давлений смеси жидких углеводородов могут претерпевать изменения химического состава и агрегатного состояния в сторону, как уменьшения, так и увеличения энтропии системы. Растворимость газа в жидкости при постоянной температуре – прямая пропорциональная зависимость от давления над жидкостью – может не проявляться. Для растворов нефтепродуктов принцип Вант-Гоффа не выполняется, так как при растворении реальное число частиц отличается от числа растворенных молекул. Для смеси жидких углеводородов парциальное давление насыщенного пара компонента раствора не имеет прямой пропорциональной зависимости от его мольной доли в растворе. Растворение газов в органических жидкостях нередко сопровождается поглощением теплоты, в подобных случаях с ростом температуры растворимость газов увеличивается. Для многокомпонентных химических систем необходимо анализировать кинетику течения всех возможных реакций, имеющих значение энергии активации, соответствующее воспроизводимому диапазону термодинамических параметров, а также разложению всех сложных реакций на элементарные стадии.

Рабочей жидкостью гидросистемы является многокомпонентная смесь технических углеводородов, что значительно усложняет прогнозирование ее реологических свойств в зависимости от условий. В соответствии с существующими представлениями, основанными на коллоидно-химических теориях, нефтепродукты являются сложными смесями, различающимися отношением концентраций высокомолекулярных соединений к низкомолекулярным соединениям. Межмолекулярные взаимодействия склонных к структурированию высокомолекулярных соединений приводят к образованию пространственных надмолекулярных структур, состоящих из множества макромолекул. В зависимости от характера связей надмолекулярные структуры делят на физические ассоциаты, в которых действуют силы Ван-дер-Ваальса, и на физико-химические комплексы с более прочными химическими связями. Физические ассоциаты способны при определенных условиях переходить в комплексы (кристаллиты). Следовательно, высокомолекулярные соединения в нефтепродуктах

могут находиться в виде ассоциатов или комплексов в зависимости от условий и свойств, входящих в состав смеси соединений. Надмолекулярные структуры переводят систему в метастабильное состояние, при котором возможно расслаивание на фазы и придания ей свойств, отличных от свойств истинных растворов. Реологические свойства дисперсной систем, находящейся под действием высоких давлений и динамических нагрузок, целесообразно рассматривать с учетом возможных изменений ее качественного состава и агрегатного состояния относительно исходных при нормальных условиях. Для описания взаимодействия частиц дисперсной системы рационально использовать метод ДЛОФ, который позволяет учесть, как электростатическое взаимодействие частиц, так и не электростатические силы отталкивания частиц. Данный метод игнорирует значения непотенциальных сил, возникающих при сближении частиц, что требуется учитывать при расчете погрешности. Значение суммарной силы взаимодействия определяют по значению молекулярно-электростатического потенциала парного взаимодействия частиц с максимумом W_δ и двумя минимумами: ближним $W_m = -\infty$ и дальним W_c , отображающими прочность сцепления частиц.

$$W = Ba \exp(-\chi h) - \frac{aK}{h}$$

Значительная часть свойств реальных жидкостей описывается на основе эмпирических или полуэмпирических методов, которые приводят к неким расхождениям с опытными данными и ограничены интервалами изменения параметров состояний или группой жидкостей, что требует сравнительного анализа численных результатов с данными полученными в ходе эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Алемасов, В.Е.* Теория ракетных двигателей. 3 изд. – М: Машиностроение, 1980. 533 с.
2. *Беляев, Е.Н.* Математическое моделирование рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей. – М: Изд-во МАИ, 1999. 228 с.
3. *Бибик, Е.Е.* Реология дисперсных систем. – Л: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. 172 с.
4. *Терентьев, О.А.* Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве. – М.: Лесная пром-ть, 1980. 248 с.
5. *Фукс, Г.И.* Вязкость и пластичность нефтепродуктов. – М.-Ижевск, 2003. 328 с.
6. *Циклис, Д.С.* Техника физико-химических исследований при высоких и сверх высоких давлениях. 4 изд. – М.: Наука, 1976. 432 с.

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF HEATHYDRAULIC AND CHEMICAL PROPERTIES OF WORKING LIQUIDS IN HIGH PRESSURE HYDRAULIC ACTUATORS

© 2013 S.N. Rednikov, K.V. Naygert

South-Ural State University, Chelyabinsk

In article the character features of description the mathematical model of heathydraulic and chemical properties of working liquids are marked out. Authors give the principal aspects of creation the model of working process of high pressure hydraulic system for actual liquid. The special attention is paid to not stationarity of system hydrodynamics and physical and chemical processes which are flowing in liquid medium. The main advantage of offered model is possibility of accounting the greatest possible quantity factors influencing on rheological property of investigated medium.

Key words: viscosity, mathematical model, heathydraulic properties, nonstationary hydrodynamics, rheology of hydrocarbons