

УДК 532.1

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

© 2013 С.Н. Редников

Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет), г. Челябинск

Поступила в редакцию 27.03.2013

Статья посвящена вопросам математического моделирования реологических характеристик углеводородов при высоких давлениях. Приведено описание наиболее распространенных методов моделирования течения. Подробно рассмотрены вопросы моделирования способности жидких сред сопротивляться сдвигу.

Ключевые слова: *давление, температура, вязкость, углеводороды*

Одной из тенденций развития современных технических систем является миниатюризация, как правило, сопровождаемая скачкообразным ростом параметров, так пример современные топливные системы имеют давление впрыска компонентов свыше 1000 бар, системы 10-15 летней давности имели аналогичный параметр порядка 100-150 бар, современные системы гидроабразивной резки металлов функционируют при давлениях до 1200 бар, аналогичная ситуация возникает и в машиностроительной и специализированной гидравлике. Создатели подобных систем сталкиваются с достаточно большим количеством малоизученных, а то и вовсе не исследуемых явлений. Последние крупно масштабные экспериментальные исследования, проводимые в России в данной области, были свернуты в конце 90-х годов по понятным причинам. В тоже время зарубежные исследования поведения жидкости при высоких и сверхвысоких давлениях продолжают интенсивно проводиться. Следует учитывать, что исследуя поведение жидкости (в частности, углеводородов) в макро объемах при данных параметрах мы фактически имеем дело с уровнями давлений, возникающих в граничных слоях при контактных давлениях в областях полусухого трения, что позволяет надеется на получение новых антифрикционных материалов и разработку методов снижения износа. Кроме того, на сегодняшний день не существует обобщенной теории движения жидких сред в области высоких давлений, что делает весьма актуальным данное направление исследований.

Математической основой для исследования является система дифференциальных уравнений сплошности, движения, энергии, состояния, переноса излучения, диффузии, то есть система, выражающая законы сохранения массы, количества движения, энергии и связывающая такие

параметры рабочего тела как давление, плотность и температура. Значительная математическая сложность данной системы уравнений затрудняет получение её аналитического решения в общем виде. Изучая движение жидкой среды, достаточно трудно определить истинные траектории каждой отдельной частицы, кроме того, в большинстве практически важных случаев в этом нет острой необходимости [3]. Поэтому целесообразней искать решение уравнений движения, энергии, неразрывности, полученных путём осреднения уравнений, описывающих мгновенное состояние среды, принимая ряд допущений, позволяющих без потери точности производить исследование течения. Широкое применение аналогичных математических моделей при решении сходных задач в аэродинамике и других отраслях требует хотя бы беглого рассмотрения особенностей математической модели, допущений принятых для упрощения решения, объяснения выбора метода замыкания уравнений Рейнольдса из многообразия применяемых на практике. Переход от уравнений Навье-Стокса к уравнениям Рейнольдса связан с выбором способа осреднения. Данная процедура применяется для упрощения решения, сглаживания пульсаций, повышения устойчивости решения [1]. Различают ряд способов осреднения, например: осреднение по времени, осреднение по пространству, осреднение по ансамблю, но при исследовании переносных свойств несжимаемой среды применение различных способов осреднения приводит к сходному результату. Преобразуя выше приведенным способом параметры в уравнениях Навье-Стокса и производя оценку порядка членов, входящих в уравнения, сохраняя все члены порядка $O(1)$ и отбрасывая члены более высоких порядков, получаем хорошо известные уравнения:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u_y) = 0$$

Редников Сергей Николаевич, кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Гидравлика и гидроневомосистемы». E-mail: srednikov@mail.ru

$$\rho(u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y}) = \frac{\partial}{\partial y} ((\mu + \mu_t) \frac{\partial u_x}{\partial y}) - \frac{\partial \mathcal{P}}{\partial x}$$

$$\rho c_p (u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y}) = u_x \frac{\partial \mathcal{P}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} ((\lambda + \lambda_t) \frac{\partial T}{\partial y}) + (\mu + \mu_t) (\frac{\partial u_x}{\partial y})^2 ;$$

где: u_x, u_y – составляющие скорости; $\mu, \mu_t, \lambda, \lambda_t$ – соответственно динамическая вязкость, теплопроводность газа и турбулентные (вихревые) вязкость, теплопроводность.

Для приведения уравнений к виду использовалась гипотеза Буссинеска [2, с. 120], позволяющая связать корреляции пульсаций различных величин с градиентами осредненных значений:

$$-\rho \overline{u'v'} = \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

Нетрудно заметить, что число неизвестных в уравнениях Рейнольдса превышает число основных уравнений, а это, в свою очередь, требует использования приближенных методов решения, применения дополнительных допущений. В частности, наибольшее распространение получили методы, основанные на установлении дополнительной связи между турбулентными напряжениями и параметрами осредненного турбулентного потока, но существует и альтернативный подход, основанный на исследовании статистических свойств поля турбулентного потока. Для замыкания кажущихся турбулентных напряжений и тепловых потоков обычно принимается та или иная модель турбулентности. Модели турбулентности для замыкания уравнений Рейнольдса обычно подразделяют на три группы. Отдельно выделяют модели турбулентной вязкости, где применяется в том или ином виде гипотеза, выдвинутая более 100 лет назад Буссинеском, о связи кажущихся турбулентных сдвиговых напряжений со скоростью средней деформации через так называемую «турбулентную» вязкость. Причём здесь можно отметить простейшие алгебраические модели, модели с одним обыкновенным дифференциальным уравнением, модели с несколькими дополнительными уравнениями в частных производных, которые необходимо решать для получения параметров описывающих течение.

Получили развитие и распространение модели, основанные на использовании понятия рейнольдсовых напряжений. Для последних моделей характерно отсутствие предположения о пропорциональности средней скорости деформаций и турбулентных напряжений. Общим недостатком алгебраических моделей турбулентности является невозможность определения влияния на структуру турбулентности со стороны потока, находящегося выше по течению. Последнее связано с тем, что алгебраические модели дают оценку локальных параметров. Кроме того, для учёта специфических эффектов приходится менять константы в

рассматриваемых моделях, что затрудняет возможность их использования для прогнозирования характеристик сложных течений. Стремление создания более общих моделей турбулентности является основной целью при разработке более сложных моделей турбулентности. Большинство из данных моделей основывается на предположении о линейной зависимости турбулентных напряжений от градиентов осредненной скорости и температуры, но следует отметить, что с помощью данных моделей возможно получение информации только об осредненных характеристиках потока, а не о характере турбулентности, что, несомненно, является достаточно крупным недостатком. С этих позиций более предпочтительными выглядят дифференциальные модели турбулентности. Незначительно отличаясь по сложности численной реализации от градиентных моделей, они обладают большей универсальностью, в том числе и за счёт учёта большего количества эффектов, а также за счёт большей, чем в градиентных моделях, варируемости величин. Значительное число работ по исследованию турбулентных течений с использованием данных моделей указывают на возможность успешного описания турбулентных характеристик в достаточно сложных течениях, в том числе не автоматических [3].

Несмотря на то, что основные идеи, заложенные в большинство дифференциальных моделей, основанных на использовании уравнений переноса для характеристик турбулентного течения таких, как: E – энергия турбулентности, L – масштаб турбулентности, ε – скорости диссипации турбулентной энергии, τ – турбулентное трение, ν_t – кинематический коэффициент турбулентной вязкости (μ_t – динамический коэффициент турбулентной вязкости) были выдвинуты ещё в работах А.Н. Колмогорова, Л. Прандтля, В.Г. Невзглядова, П. Брэдшоу, Г.С. Глушко [1, с. 33].

При всём разнообразии существующих моделей с их помощью удаётся с достаточной достоверностью определять параметры течения ньютоновских жидкостей. При рассмотрении течения неньютоновских сред или сред, проявляющих неньютоновские свойства при воздействии внешних условий, таких как давление, скорость сдвига, релаксационные эффекты, достоверность получаемых результатов снижается. Исследованием поведения неньютоновских сред в последние годы посвящено значительное количество исследовательских работ [1, 2, 4, 6]. Рассматривая основные

направления в теории вязкости, необходимо отметить, что доминируют два направления: рассмотрение жидкости как реального газа и рассмотрение жидкого состояния как близкого по природе к твердому телу. Первое направление использует методы статистической механики, достаточно разработанные для газового состояния. Второе направление основывается на результатах рентгенографического анализа. К теоретическим работам, авторы которых предполагали, что жидкость необходимо рассматривать как вариант структуры твердого тела, можно отнести работы Я.И. Френкеля, Андраде, С.Э. Хайкина. Теории А. Гольдгаммера, Эйринга-Юэлла [4, с. 57, 2, с. 112] близки сторонникам, которые рассматривают жидкость как систему близкую к газу.

Представляет интерес рассмотреть несколько теорий, которые дают представление о развитии представлений о вязкости вещества, позволяют с той или иной степенью достоверности дать качественную и количественную картину данного явления, а также согласуются с экспериментальными исследованиями. Разрабатывая теорию вязкости, Эйнштейн [4] исходил из гидродинамических уравнений для систем макроскопических твердых сферических частиц, которые при сдвиге приобретают дополнительное вращательное движение, увеличивая рассеивание энергии. В отличие от теории Эйнштейна теория Герцога и Кудара [6, с. 39] сводится к учету сил вращения многоатомных молекул вокруг осей определяемых структурой вещества. Позднее Б.В. Бак [1, с. 161] предложил влияние дипольности в определенной ориентации молекул на вязкость. Предполагая, что вязкость жидкостей определяется характером молекулярного взаимодействия и зависит от расстояний между молекулами, А.И. Бачинский [4, с. 112] предположил, что вязкость является функцией плотности жидкости. Основой теории Бернал-Уорда, Роджера

[4, с. 124] является взаимосвязь вязкости и молекулярного строения жидкости. Исследуя поведения суспензий Гудив [5] предположил влияние на вязкость характера и прочности связей между частицами, составляющими вещество, и продолжительности их существования. Тиксотропные свойства вещества объяснялись Гудивом как следствие структуры вещества. Весьма интересны работы О.А. Терентьева, Ю.Д. Алашкевича [6] и других, указывающих на влияние на вязкость формы и взаимодействия включений в жидкости.

Рассматривая поведение углеводородов при высоких давлениях нельзя не отметить наблюдаемые у многих веществ тиксотропные свойства, влияние истории нагружения, изменение оптических свойств, свидетельствующих об изменениях в структуре вещества, не говоря уже о влиянии инородных механических частиц на реологические характеристики. Учет влияния только выше перечисленных факторов в рамках модели поведения углеводородов представляет значительные трудности, но несомненно повысит точность расчёта поведения углеводородов при высоких давлениях

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Галимзянов, Р.Ф. Теория внутреннего турбулентного движения / Р.Ф. Галимзянов, Ф.Г. Галимзянов. – Уфа: Эксперт, 1999. 352 с.
2. Колесниченко, А.В. Турбулентность многокомпонентных сред / А.В. Колесниченко, А.В. Маров. – М.: Наука, 1998. 336 с.
3. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкостей и газов. – М.: Наука, 1973. 848 с.
4. Фукс, Г.И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов. – М.-Ижевск, 2003. 328 с.
5. Шрамм, Г. Основы практической реологии и реометрии. – М.: КолосС, 2003. 312 с.
6. Терентьев, О.А. Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве. – М.: Лесная промышленность, 1980. 248 с.

MATHEMATICAL MODELING THE RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF HYDROCARBONS AT HIGH PRESSURE INFLUENCE

© 2013 S.N. Rednikov

South-Ural State University
(National Research University), Chelyabinsk

Article is devoted to questions of mathematical modeling the rheological characteristics of hydrocarbons at high pressure. The description of the most widespread methods of a flow modeling is provided. Explicitly questions of modeling the ability of fluid mediums, resistant to shift, are considered.

Key words: *pressure, temperature, viscosity, hydrocarbons*