

УДК 532.1

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ ДАВЛЕНИЯХ СВЫШЕ 150 МПа

© 2012 С. Н. Редников

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

Рассмотрены вопросы разработки и эксплуатации установки измерения вязкости углеводородов при высоких давлениях. Приведено описание конструкции экспериментальных установок.

Давление, температура, вязкость, углеводороды.

К настоящему времени существует большое количество работ экспериментального и теоретического характера, посвящённых исследованию структуры жидкости и псевдопластичного состояния вещества при давлениях менее 1000 бар. В то же время обзор литературы показал, что работ, посвящённых исследованию теплогидравлических характеристик углеводородов в области фазовых переходов при давлениях свыше 1000 бар, немного. Изменение давления способствует прохождению различных химических реакций (если речь идёт не о простых веществах) или способствует им, в частности конденсации, полимеризации и молекулярной перегруппировке. Процессы изменения давления оказывают влияние не только на вязкость, но и на другие теплогидравлические характеристики жидкости. Проведённый анализ существующего на ранке диагностического и исследовательского оборудования не выявил единичного устройства, способного производить определение вязкости, теплоёмкости, зависимости плотности от давления и температуры углеводородов в диапазоне давлений от 1 до 4500 атмосфер и температур от 0 до 150°C.

Существующие системы определения вязкости рабочих сред, способные функционировать в заданном диапазоне давлений, (как правило, являются разновидностями вискозиметров Стокса), оснащены системой фиксации времени перемещения тела под действием силы тяжести внутри контейнера, где и создаётся требуемое давление [1]. Подобный подход, по мнению автора, не совсем корректен, так как возможность полного учёта начальных сдвиговых напряжений проблематична. Применение вискозиметров, использующих эффект затухающих колеба-

ний, при исследовании вязкости углеводородов при высоких давлениях, ограничено эффектами, связанными с изменением механических свойств материалов упругого подвеса при давлениях свыше 200 МПа [2]. Пригодность этих аппаратов для изучения неньютоновских свойств жидкости, свойственных углеводородам, при данных условиях требует дальнейшего изучения. Выходом из данной ситуации является создание комплекса, позволяющего определять вязкостную характеристику углеводородов с учётом давлений и скоростей сдвига, тепловыделения, возможного в ряде углеводородов в данном диапазоне давлений, изменения плотности и теплоёмкости.

Для исследования вязкости и других теплогидравлических свойств углеводородов в условиях высокого и сверхвысокого давления была создана серия вискозиметров. Были разработаны конструкции капиллярного и ротационного вискозиметров.

Капиллярный вискозиметр представляет собой прибор, принцип работы которого основан на измерении расхода определённого объёма исследуемой жидкости при фиксированном перепаде давления, являющемся функцией её вязкости. Применённый для исследования вязкостных характеристик углеводородов капиллярный вискозиметр (рис. 1) оснащён капилляром диаметром $d = 0,5$ мм длиной 95 мм, выполненным из твёрдого сплава, что, как предполагалось, обеспечивает ламинарный режим движения жидкости во всём диапазоне реализуемых расходов. Перепад давлений при ламинарном движении жидкости в капилляре известной геометрии однозначно определяет вязкость вещества.

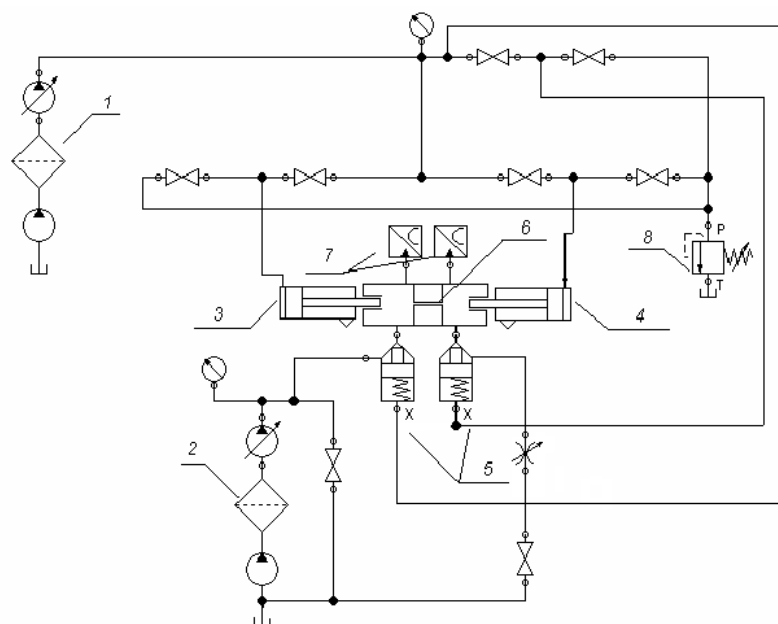


Рис. 1. Схема капиллярного вискозиметра

Замер давления по границам капилляра производится манганиновыми манометрами. Движение жидкости осуществляется путём перемещения системы плунжеров, входящих в состав мультипликаторов давлений, необходимых для получения давлений более 200 МПа. Отдельный контур используется для заполнения исследуемой жидкостью и создания предварительного давления в полости вискозиметра. Регистрация расхода жидкости, а также степени изменения объёма с ростом давления осуществляется путём отслеживания положения плунжера. Регулирование скорости движения плунжеров осуществлялось дросселем. Прохождение исследуемой жидкости через рабочую полость однократное. При работе на давлениях свыше 10^8 Па применялись лишь самоуплотняющиеся уплотнения, аналогичные применённым Циклисом [3].

По данным [1] капиллярные вискозиметры превосходят ротационные в точности замеров при исследовании ньютоновских жидкостей, но сильно им уступают при определении характеристик вязкоупругих систем. Это связано с тем, что при течении неньютоновских сред наблюдается отличие от параболической зависимости скорости сдвига при изменении расстояния от стенки до оси канала. Следовательно, точно определить скорости сдвига по всему сечению капилляра весьма затруднительно. Между тем капиллярный вискозиметр весьма эффекти-

вен для определения вязкости углеводородов в области давлений ниже давлений фазовых переходов при заданной температуре.

Ротационный вискозиметр - прибор, основанный на измерении крутящего момента, передаваемого испытуемой жидкостью чувствительному элементу и являющегося функцией ее вязкости. Ротационный метод заключается в помещении жидкости в малый зазор между двумя телами, для сдвига исследуемой среды. Данный комплекс включает блок создания высокого давления, контейнер высокого давления, измерительные модули, блок съёма и обработки информации. В качестве измерительного блока применён вискозиметр с контролируемым напряжением сдвига. В вискозиметрах с контролируемым напряжением и измерительной системой Серле задаётся мощностная характеристика приводного двигателя и контролируется угол поворота подвижного тела (цилиндра). Крутящий момент передается непосредственно на вал ротора, жёстко соединённого с подвижным телом. Измерение скорости вращения внутреннего тела (угла его поворота) позволяет определять скорость сдвига, а крутящий момент — напряжение сдвига. Такая система обеспечивает возможность снятия вязкостной характеристики во всём диапазоне скоростей сдвига. В связи с предполагаемой возможностью работы на электропроводящих жидкостях применение щёточных электродвигателей было признано

нецелесообразным, аналогично были отвергнуты конструкции с вынесенным за пределы контейнера высокого давления двигателем.

В качестве измерительной ячейки применены коаксиальные цилиндры с вращающимся внутренним и неподвижным наружным, внутренний цилиндр приводится во вращение трёхфазным электродвигателем, оснащённым системой регулирования и контроля оборотов. Отношение радиусов внутреннего и наружного цилиндров для разных измерительных ячеек менялось в диапазоне 1.01–1.03. Для замера давления в разработанных вискозиметрах применены манганиновые манометры, имеющие рабочий диапазон от 200 до 1000 МПа, но используемый в датчиках материал меняет своё электрическое сопротивление как при изменении давления, так и при изменении температуры [3, 4]. Расчёт температуры исследуемой жидкости в камере высокого давления проводился, основываясь на результатах замеров температурных полей наружной поверхности аппарата. Процесс теплообмена рассматривался как процесс передачи теплоты через многослойную стенку из материала с известной теплопроводностью при граничных условиях, характеризующихся постоянным коэффициентом теплоотдачи в окружающую среду и изменяющейся температурой исследуемой среды внутри аппарата. Такой подход позволяет достаточно легко определить время стабилизации температуры, получить значения изменения температуры жидкости на границе внутренней поверхности корпуса как после повышения давления, на этапе стабилизации, так и при движении жидкости в капилляре. Недостатком такого подхода является высокая тепловая инерционность процесса распространения тепла в корпусе аппарата. Кроме того, этот подход требует высокой точности определения температур, не ниже десятых долей градуса, чтобы оценить температуру исследуемой среды с точностью до градуса. Определение температуры поверхности корпуса осуществлялось при помощи тепловизора с разрешающей способностью 0,08 градуса.

Была решена задача определения температуры на границе «корпус - исследуемая среда» двумя методами: методом прямого численного моделирования в программном

пакете SolidWorks (Cosmos Works) и по упрощённому выражению для определения температуры исследуемой среды.

Процесс теплопереноса в этих условиях описывается классическим дифференциальным уравнением теплопроводности

$$c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (1)$$

Стадии исследуемого процесса охватывают промежутки времени, характеризующиеся величинами критерия Фурье $Fo \leq 0,55$, где $Fo = at_0/l^2$, a – коэффициент температуропроводности, l – характерный линейный размер тела, t_0 – характерное время изменения внешних условий, ρ – плотность, c_p – теплоёмкость, λ – теплопроводность, τ – время, t – температура.

Однако определённое затруднение вызывает то, что температурные поля являются функциями не только физических и геометрических свойств тела и граничных условий, но и начального теплового состояния тела. Это приводит к сложным уравнениям для теплофизических свойств исследуемого вещества и затруднённой обработке опытных данных. Чтобы упростить решения уравнения, принимаются следующие допущения: потери тепла с боковой части поверхности корпуса аппарата отсутствуют; распределение температуры по объёму в начальный момент времени и в поперечном сечении для любого момента времени принимается равномерным, тепловое сопротивление контакта отсутствует, стенка аппарата цилиндрическая многослойная.

С учётом допущений решение дифференциального уравнения теплопроводности принимает вид:

$$t = A + Bx + C \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{4a\tau}}} e^{-\frac{x}{\sqrt{4a\tau}}} d\left(\frac{x}{\sqrt{4a\tau}}\right), \quad (2)$$

где A, B, C – константы интегрирования.

Постоянная интегрирования A определяется для условий $x = 0$ и для начального момента времени $t = t_{x=0} = A$.

При $\tau = 0$ уравнение теплопроводности принимает вид:

$$t = A + B \cdot x + C.$$

Из него следует, что $B = 0$, так как $t_n = \text{const}$ и $C = t_n - t_{x=0}$.

Кроме того, одновременно решалась задача определения количества теплоты, выделяющейся в исследуемой жидкости, и изменения теплопроводности при повышении давления.

Результаты натурного и математического моделирования (рис. 2, 3) показывают

достаточную точность предложенного метода определения температуры. Метод позволяет определять теплоту фазовых переходов и химических реакций, проходящих при высоких давлениях.

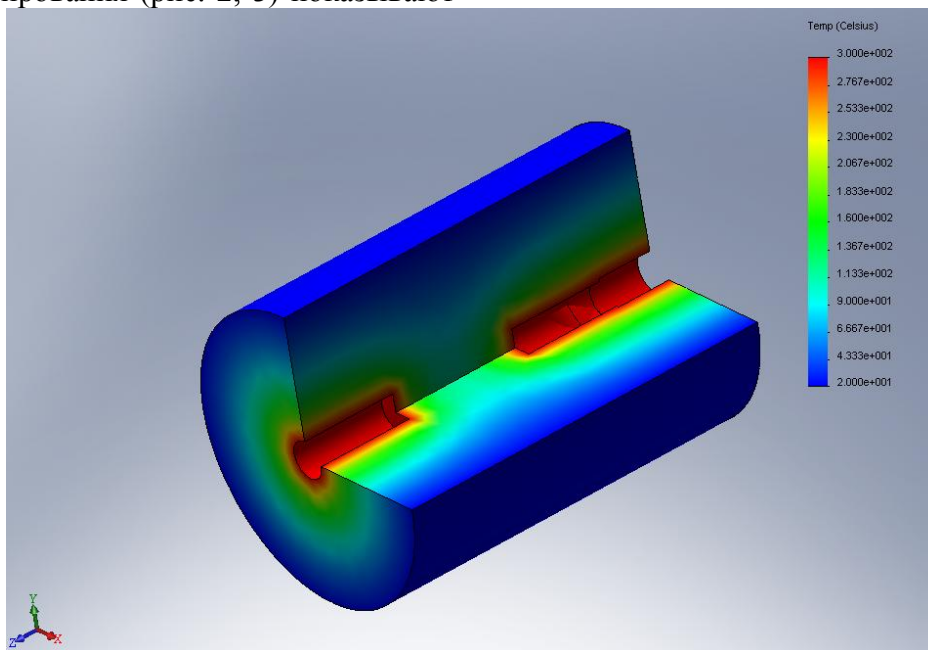


Рис. 2. Результат моделирования распределения температуры, выполненный с использованием программного пакета SolidWorks

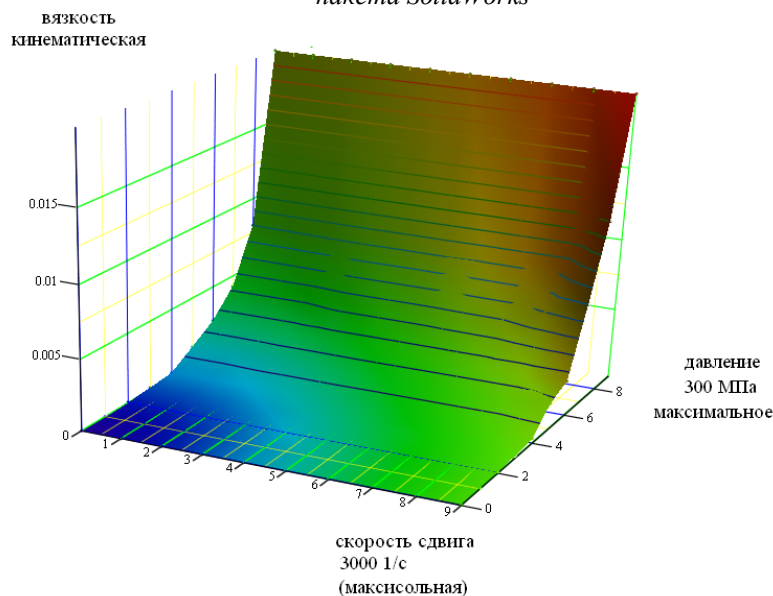


Рис. 3. Результат определения вязкости для индустриального масла ИЗО

При использовании дросселирования потока как системы ограничения скорости движения жидкости в капилляре необходимо обеспечивать однократное прохождение жидкости через капилляр. Тарировка оборудования производилась на воде и индустри-

альном масле и-30, данные по вязкости взяты из работы [5]. Поправочные коэффициенты определены по частотам вращения 1000 и 8000 об/мин. При температуре 30 градусов распределение соответствует нормальному закону. При замерах при 20 градусах и

частоте 1000 об/мин совпадение в пределах инструментальной погрешности, при 8000 об/мин усреднённые данные по вязкости ниже эталонных. С ростом частоты до 17000 об/мин разрыв возрастает и средние значения устойчиво выходят за пределы доверительного интервала. В четырёх сериях опытов ситуация стабильно повторяется.

Таким образом, создана серия приборов, позволяющих определять теплогидравлические характеристики углеводородов при давлениях до 4500 атм.

Библиографический список

1. Шрам, Г. Основы практической реологии и реометрии [Текст] / Д.С. Циклис: пер. с англ. – М.: КолосС, 2003.
2. Бриджмен, П.В., Исследования больших пластических деформаций и разрыва [Текст] / П.В. Бриджмен; пер. с англ. – М.: Мир, 1955.
3. Циклис, Д.С. Техника физико-химических исследований при высоких давлениях [Текст] / Д.С. Циклис. – 3 изд. – М.: Наука, 1965.
4. Бриджмен, П.В. Физика высоких давлений [Текст] / П.В. Бриджмен; пер. с англ. – М.: Мир, 1935.
5. Кучеров, В.Г. Теплофизические свойства водонефтяных эмульсий и методика их расчета для условий сбора и подготовки нефти [Текст]: дис. ... канд. техн. наук 25.00.17 / В.Г. Кучеров. – М.: 1987. - 141 с.

THE EQUIPMENT FOR RESEARCH OF PROPERTIES OF HYDROCARBONS AT PRESSURE FROM ABOVE 150 MPa

© 2012 S. N. Rednikov

South Ural State University, Chelyabinsk

Creation of viscometers has been considered for observation and identification of parameters of non-Newtonian fluids. In the paper, problems of measurement of viscosity and changes of temperature of hydrocarbons under the pressure of more than 150 MPa are considered.

Pressure, viscosity, temperature, hydrocarbons.

Информация об авторах

Редников Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. E-mail: srednikov@mail.ru. Область научных интересов: автоматизация машиностроения, расчет и контроль массо-геометрических характеристик изделий.

Rednikoff Sergey Nikolaevich, The candidate of engineering science, Associate Professor of «Mechano-Assembly Production Automation» department of the South Ural State University. E-mail: srednikov@mail.ru. Area of Research: machine industry automation, mass-geometrical characteristics of work-pieces account and monitoring.