

ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЯЗКОСТИ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

С.Н. Редников¹

Рассматриваются проблемы, возникшие перед автором при проектировании и эксплуатации установки измерения вязкости углеводородов при высоких давлениях. Приведено описание конструкции экспериментальной установки. Подробно рассмотрены вопросы определения давления и температуры исследуемой среды.

Ключевые слова: давление, температура, вязкость, углеводороды.

Введение

Вязкостные характеристики углеводородов в диапазоне давлений менее 150 МПа достаточно хорошо изучены [1–3]. Исследование поведения углеводородов при давлениях более 150 МПа, а также в области фазовых переходов, где могут наблюдаться как процессы стеклования, так и кристаллизации [2], затруднено появлением фаз, сильно отличающихся по вязкости. Кроме того, при давлениях выше 200 МПа при проектировании вискозиметров необходимо принимать во внимание изменение с ростом давления свойств конструкционных материалов, параметров измерительных устройств, химической активности среды и других факторов [4].

Анализ конструкций установок, используемых при давлениях свыше 150 МПа, показывает, что преобладают модификации вискозиметра Стокса, оснащенные системой фиксации времени перемещения тела под действием силы тяжести внутри контейнера, где и создается требуемое давление [5]. Подобный подход, по мнению автора, не совсем корректен, так как возможность полного учёта начальных сдвиговых напряжений проблематична. Применение вискозиметров, использующих эффект затухающих колебаний, при исследовании вязкости углеводородов при высоких давлениях ограничено эффектами, связанными с изменением механических свойств материалов упругого подвеса при давлениях свыше 200 МПа [6]. Капиллярные и ротационные вискозиметры позволяют производить определение вязкости углеводородов при высоких давлениях с достаточной точностью.

Описание установки. 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 обеспечивает ламинарный режим движения жидкости во всём диапазоне реализуемых расходов. Перепад давлений при ламинарном движении жидкости в капилляре известной геометрии определяет вязкость вещества. 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 [5].

Проблемы, возникшие при эксплуатации установки. Известно, что точность определения вязкости при использовании капиллярного вискозиметра определяется точностью определения перепада давления на капилляре. Для замера давления применены манганиновые манометры, имеющие рабочий диапазон от 200 МПа до 1000 МПа, но используемый в датчиках материал меняет своё электрическое сопротивление как при изменении давления, так и при изменении температуры [6]. Пробные прогоны показали наличие изменения температуры. Следовательно, ставилась под сомнение точность определения вязкости. Кроме того, представляла интерес температура жидкости и её время стабилизации.

¹ Редников Сергей Николаевич – кандидат технических наук, кафедра гидравлики и гидропневмосистем, Южно-Уральский государственный университет.

E-mail: srednikov@mail.ru

Классический подход предусматривает подъем давления до заданной величины и только после стабилизации температуры организация движения в капилляре. Нельзя было исключить повторный рост температуры при создании перепада давлений на капилляре.

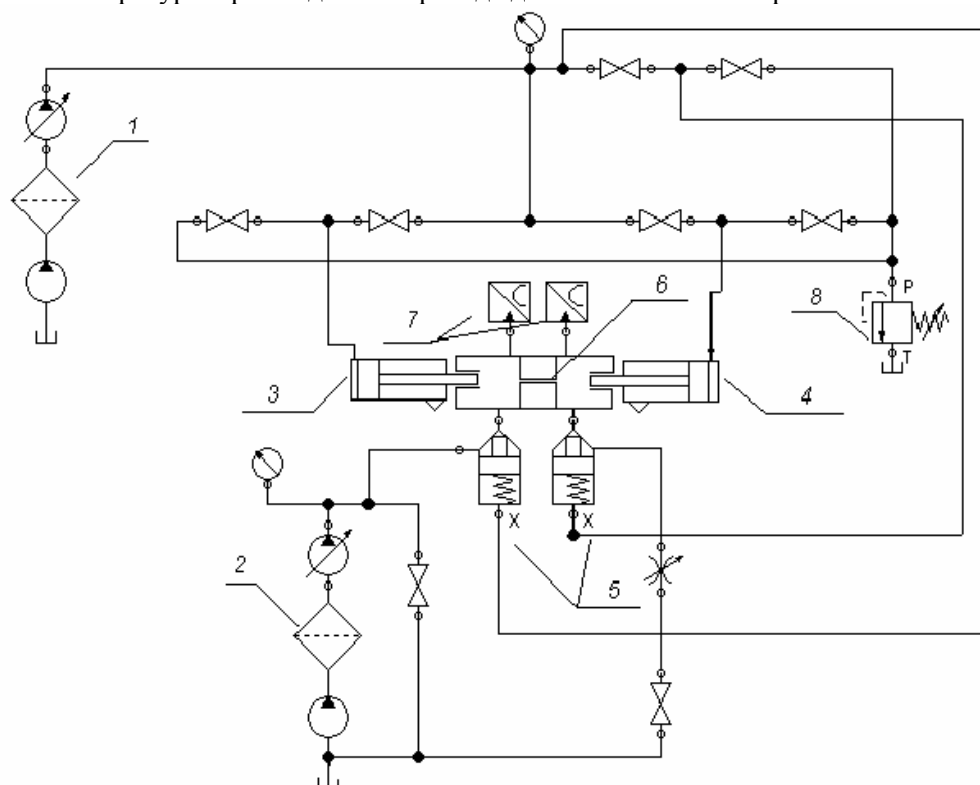


Рис. 1. Схема капиллярного вискозиметра

Подходы к решению. Поскольку отсутствие надёжной системы контроля температуры ставило под сомнение достоверность получаемых результатов, наибольшее внимание было уделено этому вопросу. Использование термпар затруднено тем, что высокое давление вызывает изменение термоэлектрической движущей силы термодатчика [4, 6], что существенно влияет на ее показания. Даже если пользоваться предложенной П.У. Бриджманом, Ф. Бонди и К. Свенсоном поправкой, точность исследований окажется очень низкой [6].

Было принято решение проводить расчет температуры исследуемой жидкости в камере высокого давления, опираясь на результаты замеров температурных полей наружной поверхности аппарата. Предложенная методика основана на том, что имеем дело с процессом теплообмена через многослойную стенку из материала с известной теплопроводностью при граничных условиях, характеризуемых постоянным коэффициентом теплоотдачи в окружающую среду, и изменяющейся температурой исследуемой среды внутри аппарата. Зная коэффициент теплопроводности материала корпуса его зависимость от давления [7] начальное распределение температур в установке, геометрию аппарата, можем рассчитывать значение температуры самой жидкости в любой момент времени. 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. Кроме того, одновременно решалась задача определения количества теплоты, выделяющейся в исследуемой жидкости, и изменения теплопроводности при повышении давления. Недостатком такого подхода является высокая тепловая инерционность процесса распространения тепла в корпусе аппарата, 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 (Cos-

mos Works), а также было получено упрощённое выражение для определения температуры исследуемой среды.

Процесс теплопереноса в этих условиях описывается классическим дифференциальным уравнением теплопроводности:

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

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.

Чтобы упростить решения этого уравнения принимаются следующие допущения: потери тепла с боковой части поверхности корпуса аппарата отсутствуют; распределение температуры по объему в начальный момент времени и в поперечном сечении для любого момента времени принимается равномерным, тепловое сопротивление контакта отсутствует, стенка аппарата цилиндрическая многослойная.

Учитывая вышеперечисленные допущения, 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 из уравнения $t = t_{x=0} = A$.

При $\tau=0$ решение уравнения теплопроводности принимает вид

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

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

Для подтверждения адекватности применённого метода измерения температуры был поставлен натурный эксперимент.

Во внутреннюю полость вискозиметра, имевшего начальную температуру 19°C , установленного в вертикальном положении, была помещена откалиброванная термопара, таким образом, чтобы она показывала температуру в зоне контакта рабочей жидкости и внутренней поверхности корпуса. Затем полость, с помещенной в нее термопарой, была заполнена водой, температура которой составляла 100°C .

После этого в течение последующих 15 мин с интервалом, равным одной минуте, делалась тепловизионная фотография внешней поверхности корпуса и проводилась запись показаний термопары.

Полученные данные представлены на рис. 2–5.

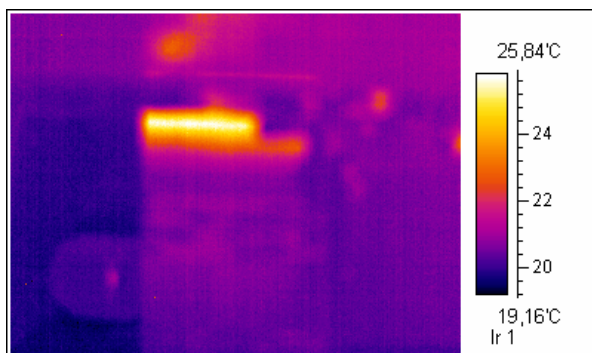


Рис. 2. Снимок, сделанный спустя 1 мин

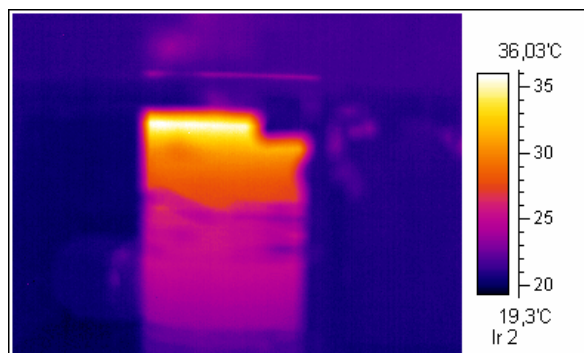


Рис. 3. Снимок, сделанный спустя 2 мин

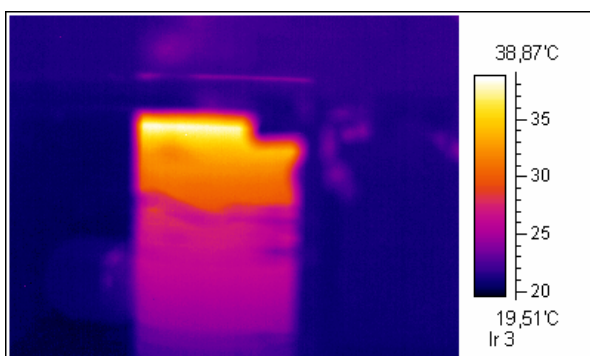


Рис. 4. Снимок, сделанный спустя 3 мин

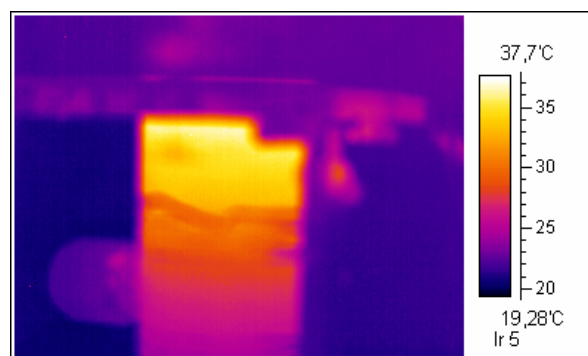


Рис. 5. Снимок, сделанный спустя 13 мин

Используя тепловизионные фотографии, определим изменение температуры t на внешней поверхности корпуса вискозиметра с течением времени (на графиках время приведено в минутах) (рис. 6).

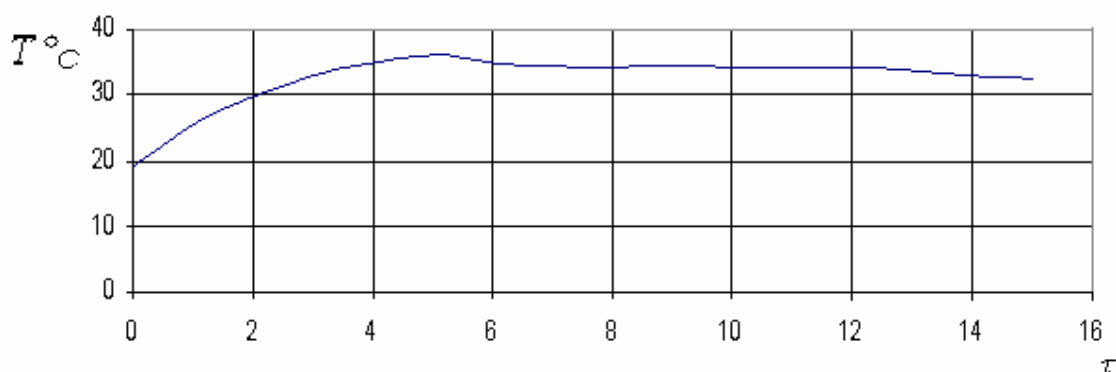


Рис. 6. Изменение температуры корпуса

Сопоставляем графики температур, определенных при помощи термопары непосредственно в зоне контакта жидкости с внутренней поверхностью, и температур, рассчитанных с использованием предложенной методики (рис. 7).

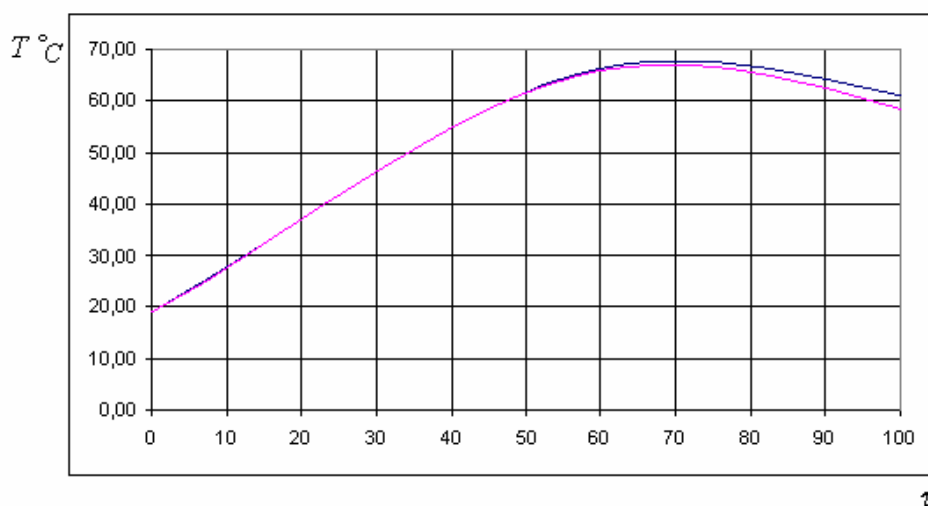


Рис. 7. Сопоставление графиков температур

Кроме того, производилось моделирование процесса нагрева с использованием программного пакета SolidWorks (Cosmos Works), результаты моделирования представлены на рис. 8.

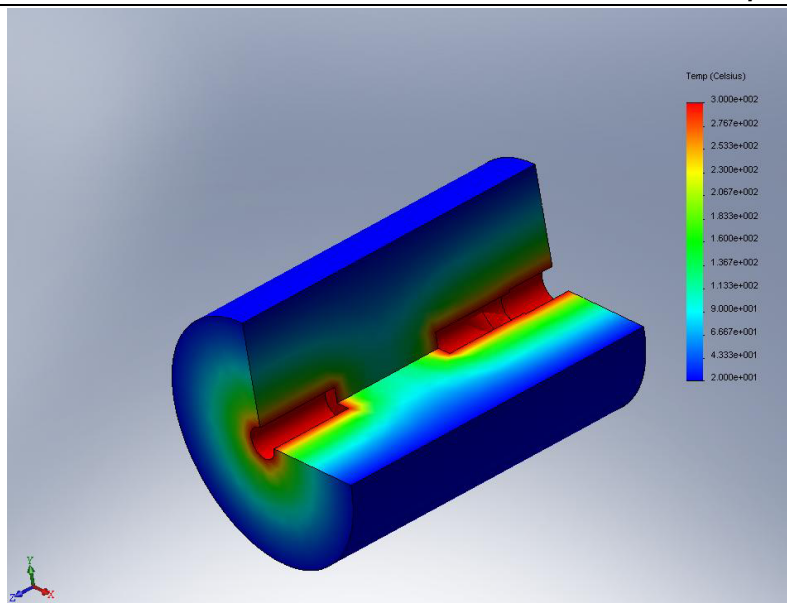


Рис. 8. Результат моделирования распределения температуры, выполненный с использованием программного пакета SolidWorks

Выводы

Результаты натурального и математического моделирования показывают достаточную точность предложенного метода определения температуры, который позволяет определять теплоту фазовых переходов и химических реакций, проходящих при высоких давлениях.

Желательно обеспечить минимальный внутренний объем исследуемой жидкости.

Литература

1. Кучеров, В.Г. Теплофизические свойства водонефтяных эмульсий и методика их расчета для условий сбора и подготовки нефти: дис. ... канд. техн. наук / В.Г. Кучеров. – М.: 1987. – 141 с.
2. Черноуцан, А.И. Физические свойства процесса стеклования / А.И. Черноуцан // Соросовский образовательный журнал. – 2001. – Т. 7, № 3. – С. 103–111.
3. Скородумов, В.Ф. Термодинамические аспекты стеклования под давлением / В.Ф. Скородумов // Журнал физической химии. – 1994. – Т. 68, № 12. – С. 2254–2256.
4. Циклис, Д.С. Техника физико-химических исследований при высоких давлениях / Д.С. Циклис. – 3-е изд. – М.: Химия, 1965. – 416 с.
5. http://www.f5-tech.de/micropvt_hp_viscometer.html?&L=1
6. Бриджмен, П.В. Исследования больших пластических деформаций и разрыва: пер. с англ. / П.В. Бриджмен. – М.: Мир, 1955. – 467 с.
7. Бриджмен, П.В. Физика высоких давлений: пер. с англ. / П.В. Бриджмен. – М.: ОНТИ, 1935. – 256 с.

Поступила в редакцию 3 октября 2011 г.

DIFFICULTIES IN RESEARCH OF VISCOSITY OF HYDROCARBONS AT HIGH PRESSURE

S.N. Rednikov¹

This article deals with the difficulties that the author faced while projecting and exploiting an installation for measuring the hydrocarbon viscosity at high pressure. He describes the experimental installation construction and analyzes the issues of defining the pressure and temperature of the researched area.

Keywords: pressure, temperature, viscosity, hydrocarbons.

References

1. Kucherov V.G. *Teplofizicheskie svoystva vodoneftianykh emul'sii i metodika ikh rascheta dlia uslovii sbora i podgotovki nefii: dis. ... kand. tekhn. nauk* (Thermophysical properties of oil-water emulsions and methods of calculation for the conditions of oil gathering and treatment: Dis. ... Cand. Eng. Sci.). Moscow, 1987. 141 p. (in Russ.).
2. Chernoutsan A.I. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal*. 2001. Vol. 7, no. 3. pp. 103–111. (in Russ.).
3. Skorodumov V.F. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 1994. Vol. 68, no. 12. pp. 2254–2256.
4. Tsiklis D.S. *Tekhnika fiziko-khimicheskikh issledovaniy pri vysokikh davleniyakh* (Technique physico-chemical studies at high pressures). Moscow: Khimiia, 1965. 416 p. (in Russ.).
5. http://www.f5-tech.de/micropvt_hp_viscometer.html?&L=1
6. Bridzhmen P.V. (Bridgman P.W.) *Issledovaniia bol'shikh plasticheskikh deformatsii i razryva* (Studies of large plastic deformation and break). Moscow: Mir, 1955. 467 p. (in Russ.).
7. Bridzhmen P.V. (Bridgman P.W.) *Fizika vysokikh davlenii* (High pressure physics). Moscow: ONTI, 1935. 256 p. (in Russ.).

¹ Rednikov Sergey Nikolaevich is Cand. Sc. (Engineering), Hydraulics and Hydropneumo systems Department, South Ural State University.
E-mail srednikov@mail.ru