

## ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ И РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ВЯЗКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕВОДОРОДОВ

*С.Н. Редников, Д.А. Хламов*

Статья посвящена вопросам разработки и эксплуатации установки измерения вязкости углеводородов при высоких давлениях. Приведено описание конструкции экспериментальной установки. Подробно рассмотрены вопросы определения вязкостной характеристики углеводородов при повышенных давлениях.

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

Широкое применение углеводородов в промышленных целях требует совершенствования наших знаний о природе реальных жидкостей для построения теории процессов переноса энергии и прогнозирования свойств веществ. Многокомпонентный состав технических смесей углеводородов значительно усложняет математическое моделирование их реологических свойств и качественного состава в зависимости от условий, требуя экспериментального подтверждения расчетных данных. Вязкость технических масел возрастает с повышением давления, при давлении 1000 атм вязкость от 8 до 40 раз выше, вязкости масла при атмосферном давлении. При этом значительная часть углеводородов ведет себя как неньютоновские жидкости. Изучение тепловых, гидравлических и химических свойств рабочих жидкостей гидроприводов высокого давления затрудняется тем, что возникающие высокие давления и гидродинамические явления, потенцируют смещение химического равновесия системы. Исследования, проведенные Бриджменом и Воларовичем [1], показали зависимость влияния давления на вязкостные характеристики образца от его химического состава. Одной из распространенных проблем в гидравлике является выпадение парафиновых и других тяжелых фракций рабочей жидкости, а при достижении давления 3000 атм олеиновая кислота, входящая в состав смазочно-охлаждающих жидкостей, твердеет и после снятия давления не возвращается в исходное жидкое состояние, меняя характеристики рабочей жидкости, в состав которой входит. Эти эффекты на сегодняшний день мало изучены. Кроме того, работ, исследующих влияние релаксации свойств углеводородов после нагружения давлением, авторам обнаружить не удалось. Такое положение дел во многом связано со сложностью оборудования необходимого для изучения данных процессов.

Наибольшее распространение на сегодняшний день получили установки высокого давления для определения вязкостных характеристик на основе вискозиметров с перемещением тела под действием силы тяжести. Несмотря на высокую точность для ньютоновских жидкостей, эти установки ограниченно применимы для изучения тиксотропных и других видов неньютоновских жидкостей.

Больше возможностей для исследования дает ротационный метод, который заключается в помещении жидкости в малый зазор между двумя телами для сдвига исследуемой среды. Изменение крутящего момента на роторе в зависимости от его частоты вращения можно расценивать как связь между напряжением сдвига и скоростью сдвига. Изменение скорости сдвига в каждой точке исследуемого образца зависит от ширины кольцевого зазора между обоими цилиндрами. Изменение скорости сдвига поперек зазора будет незначительно при условии, что щель достаточно мала, т. е. радиальное изменение указанной величины будет пренебрежимо мало. Подобным приборам свойственен концевой эффект вблизи торца, не являющегося свободной поверхностью. Ротационные вискозиметры могут действовать в режиме как с постоянной нагрузкой, так и с постоянной скоростью вращения. В первом случае к одной из измерительных поверхностей прикладывается постоянный крутящий момент (постоянная нагрузка). Во втором случае ей задается постоянная скорость вращения и оценивается крутящий момент. Одной из проблем применения ротационных вискозиметров являлась нестабильность характеристик материалов с изменением давления [2]. Это ограничивает использование торсионных систем контроля крутящего

момента. Кроме того, использование традиционных систем с двигателями постоянного тока, имеющих в своем составе щеточный узел, также оказалось неприемлемым.

Разработанный вискозиметр включал в свой состав контейнер высокого давления, систему повышения давления, системы контроля давления и температуры. Конструкция этих элементов уже была описана в работах [3, 4]. Наибольший интерес представляет конструкция непосредственно измерительной ячейки (рис. 1). Примененный метод – контроль частоты вращения и крутящего момента. Оценка крутящего момента оценивалась по потребляемой мощности электродвигателя, в качестве последнего применялся асинхронный двигатель с регулируемой частотой вращения.

Отношение радиусов внутреннего и наружного цилиндров для разных измерительных ячеек менялось в диапазоне 1,01–1,03. Диапазон давлений менялся от 1 до 5000 бар. Ограничения обусловлены прочностными характеристиками контейнера. Ограничение по максимальной скорости сдвига обусловлены ограничением предельной мощности привода измерительной системы (100 Вт). Приборная погрешность обусловлена в наибольшей степени отношением величины зазора и радиусом вращающегося цилиндра, точностью изготовления поверхностей и несоосностью. Диаметр вращающегося цилиндра – 29,2 мм. Точность изготовления – 0,005 мм. Внутренний диаметр неподвижного цилиндра – 30,2 мм. Точность изготовления – 0,005 мм. Длина вращающегося блока – 40 мм. Точность изготовления 0,01 мм. Диапазон фиксации оборотов – 10–1300 Гц. Диапазон допустимой скорости сдвига – 200–10 000 1/с. Ошибка в определении мощности привода – 0,001 Вт. Суммарная приборная ошибка – не более 2,5 % в центре рабочего диапазона. Поправочные коэффициенты определены по частотам вращения 1000 и 8000 об/мин. Замеры проведены при 20 градусах, частоте 1000 и 8000 об/мин. Усредненные данные по вязкости дали совпадение в пределах инструментальной погрешности.

Тарировочные характеристики вискозиметра представлены на рис. 2.

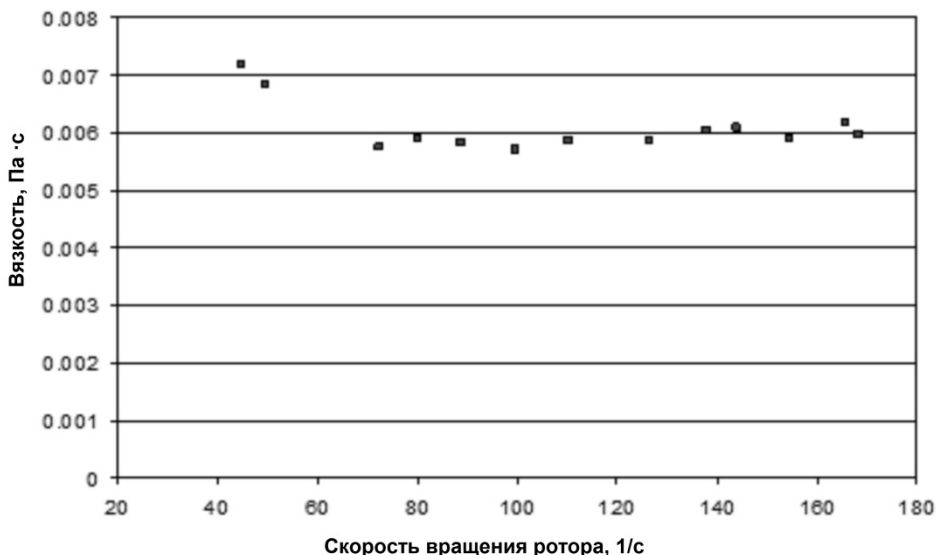
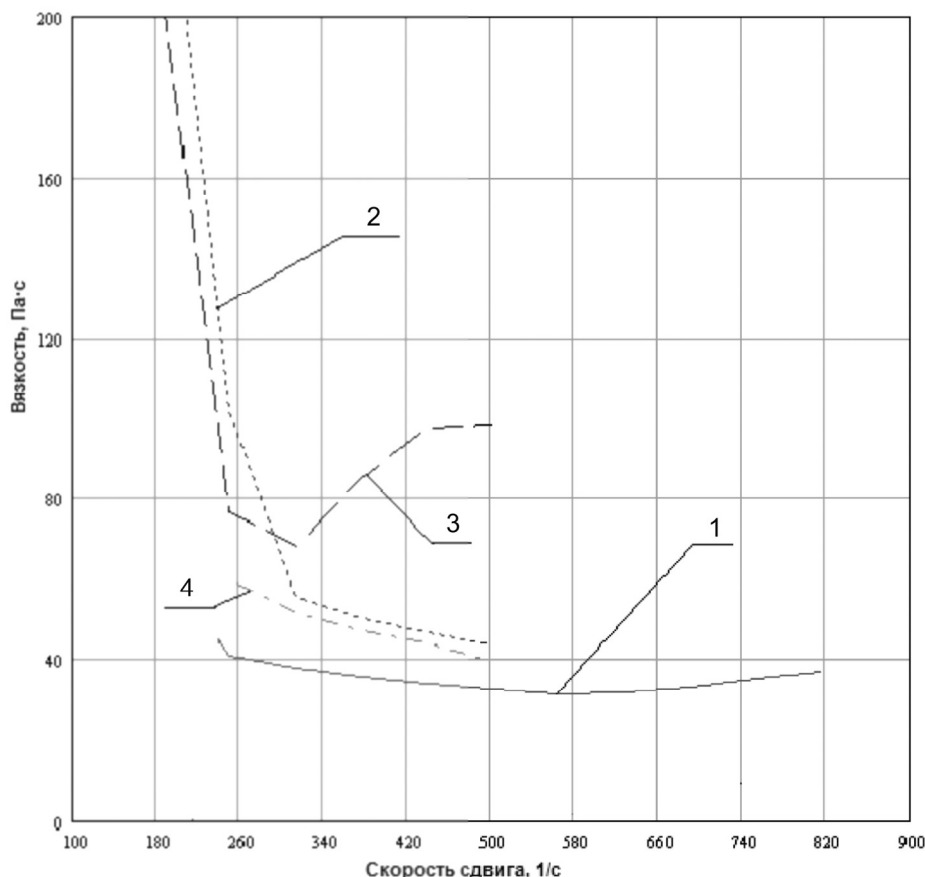


Рис. 2. Тарировочные характеристики вискозиметра (рабочая жидкость – керосин ТУ 0251-002 71162433)

Исследование эталонного масла VG 35 показало, что с ростом давления меняется вид вязкостной характеристики углеводорода (рис. 3). Наибольший интерес представляет изменение вязкости, возникшее после нагружения, до давления 2700 атм и последующего сброса давления до атмосферного.



**Рис. 3. Результаты исследования эталонного масла VG 35:**  
1 – характеристика при давлении 1 бар; 2 – характеристика при давлении 200 бар;  
3 – характеристика при давлении 420 бар; 4 – характеристика при давлении 1 бар  
после нагружения до 2500 бар время релаксации 30 с

Релаксационные процессы протекают от десятков секунд до нескольких минут. Последнее показывает, что в подобных исследованиях необходимо контролировать химическую стабильность. Наиболее информативными и чувствительными методами определения группового состава нефти являются методы газожидкостной хроматографии и инфракрасной (ИК) спектроскопии. К оптическим свойствам углеводородов относятся цвет, коэффициент лучепреломления, оптическая плотность и активность. Все эти показатели существенно зависят от химической природы вещества, состава фракций, поэтому оптические свойства углеводородов косвенно характеризуют их химический состав. Оценка коэффициента преломления показывает изменение химического состава.

В связи с высокой актуальностью проблемы доступа к нефтяным месторождениям в данной статье рассматриваются некоторые аспекты измерения вязкости при сверхвысоких давлениях буровых эмульсий для применения в условиях глубинного бурения, созданных на базе углеводородов.

При проведении экспериментов с буровыми эмульсиями на основе масла на реологические свойства жидкости могут оказывать влияние различные эффекты. Эффекты физического характера, заключаются в том, что повышение температуры приводит к увеличению броуновского движения молекул, что приводит, соответственно, к уменьшению вязкости. В буровых эмульсиях на основе минеральных масел восприимчивость эмульсии к давлению больше, чем в эмульсиях на основе воды, что обусловлено большим коэффициентом сжатия масел. Электрохимические эффекты проявляются в том, что соотношение между силами межмолекулярного взаимодействия и отталкивания может изменяться в зависимости от наличия солей в эмульсии. Растворимость солей обусловлена, прежде всего, влиянием давления и температурой [5]. Дисбаланс сил межмолекулярного взаимодействия также может вести к образованию хлопьевидных частиц в эмульсии. Эффекты протекания обычных химических реакций – реакции с высокодисперсными минералами интенсивно протекают при высоких температурах, что также может повлиять на реологические свойства эмульсии.

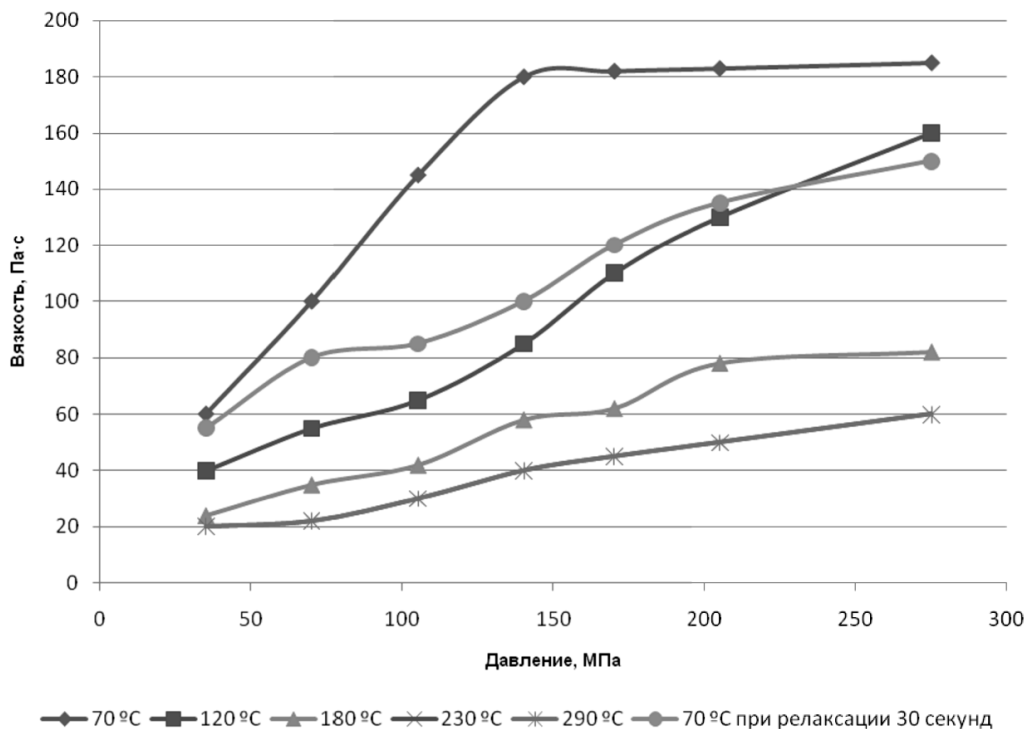


Рис. 4. Вязкостные характеристики жидкости NPHT OBM

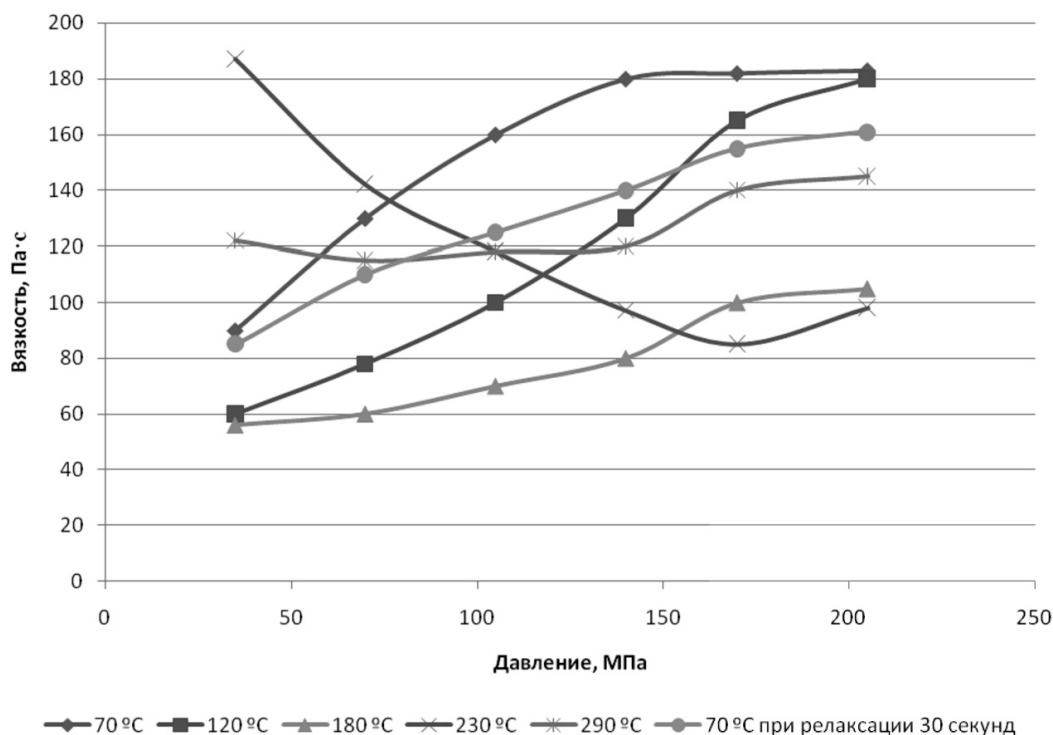


Рис. 5. Вязкостные характеристики жидкости Regular OBM

Характеристики вязкость-давление для NPHT OBM и для Regular OBM без учета релаксационных процессов были получены в исследовании [5], результаты которого представлены на рис. 4 и 5 для жидкостей NPHT OBM и Regular OBM для диапазона температур от 70 до 290 °C соответственно.

Зависимость вязкости эмульсии NPHT OBM от давления при различных температурах и частоте вращения ротора 600 мин<sup>-1</sup> показана на рис. 4.

## Контроль и испытания

---

Изменение характеристик объясняется изменением структуры жидкости в течение некоторого определенного времени, или, другими словами, релаксационными процессами, происходящими в исследуемом веществе.

Как видно из рис. 5, вязкость обычной эмульсии (Regular OBM) также растет с ростом давления и падает с ростом температуры. Этот график, однако, показывает резкое повышение и нестабильность вязкости при температурах выше 230 °С и выше, что показывает нестабильность данной жидкости при данном диапазоне температур, так как она не приспособлена для условий работы при высоких температурах.

На графике также отражено влияние релаксационных процессов в исследуемой жидкости. Время релаксации аналогично и составляло 30 с.

В целом из графиков можно видеть, что изменение давления оказывает на вязкостную характеристику большее влияние, чем изменение температуры.

Результатом проделанной работы явилось создание ротационного вискозиметра, способного исследовать вязкостно-температурные характеристики углеводородов в диапазоне давлений от 1 до 5000 атм и снятие вязкостных характеристик ряда углеводородов.

### Литература

1. Редников, С.Н. К вопросу об определении вязкости при высоких давлениях / С.Н. Редников; // Динамика машин и рабочих процессов: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф., 8–10 дек. 2009 г. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. – 353 с.

2. Редников, С.Н. Исследование вязкости углеводородов в области высоких давлении / С.Н. Редников // Инновация, экология и ресурсосберегающие технологии на предприятиях машиностроения, авиастроения, транспорта и сельского хозяйства: тр. IX Междунар. науч.-техн. конф. Ростов н/Д., 2010. – 234 с.

3. Amani, M. The Rheological Properties of Oil-Based Mud Under High Pressure and High Temperature Conditions / M. Amani // Advances in Petroleum Exploration and Development. – 2012. – Vol. 3, No 2. – P. 21–30.

**Редников Сергей Николаевич.** Кандидат технических наук, кафедра «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск). E-mail: srednikov@mail.ru, ggps@susu.ac.ru

**Хламов Дмитрий Андреевич.** Студент магистратуры, кафедра «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск). E-mail: vonhelmow@freenet.de

---

## INFLUENCE OF HIGH PRESSURE AND RELAXATION PROCESSES ON VISCOSITY CHARACTERISTICS OF HYDROCARBONS

**S.N. Rednikov, D.A. Khlamov**

The study deals with development and exploitation of high pressure viscosity measurement device. In this work we consider construction of experimental rheometer and viscosity measurements of hydrocarbons at high pressure taking into consideration relaxation processes that occur in hydrocarbon media.

*Keywords: pressure, temperature, viscosity, hydrocarbons.*

**Sergey N. Rednikov.** Candidate of engineering science, teacher of Mechano-Assembly Production Automation department, South Ural State University (Chelyabinsk). E-mail: srednikov@mail.ru

**Dmitry A. Khlamov.** Student of the Master's degree program, South Ural State University (Chelyabinsk). E-mail: vonhelmow@freenet.de

*Поступила в редакцию 13 февраля 2013 г.*