

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ  
ПРИ ЕЕ ДОБЫЧЕ И ТРАНСПОРТИРОВКЕ**

**Г. А. АЛЕСКЕРОВ, Я. Б. СУЛЕЙМАНЛЫ, Р. И. АСКЕРОВА**

*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,  
Баку, Азербайджан*

**Аннотация.** В материалах конференции представлен анализ новых технологий исследования реологических свойств нефти в трубопроводах или в лабораторных условиях при транспортировке высоковязкой и тяжелой нефти с использованием современных приборов и оборудования. Мониторинг транспортировки высоковязкой нефти по трубопроводам включает в себя ряд специализированных приборов для измерения ключевых параметров, таких как вязкость, расход, давление, температура и уровень. Основные приборы контроля: Вискозиметры необходимы для прямого измерения вязкости нефти в режиме реального времени. Поддержание необходимого уровня вязкости (часто путем нагрева) необходимо для эффективной перекачки и потока. Промышленные вискозиметры устанавливаются непосредственно в трубопровод для непрерывного мониторинга. Вибрационные (или качающиеся поршневые/штоковые) вискозиметры популярны в промышленных условиях, поскольку не имеют движущихся частей, требуют минимального обслуживания и достаточно прочны, чтобы выдерживать суровые условия. Представлена информация о сложных контрольно-измерительных приборах и вискозиметрах потока для определения реологических свойств нефти и нефтепродуктов месторождений Мурадханлы и Умбаки. Лабораторные вискозиметры используются в различных лабораторных приборах, таких как ротационные, капиллярные или вискозиметры с падающим шаром, для автономного анализа образцов. Транспортировка Мурадханлы и Умбаки высоковязкой нефти требует больше энергии, чем транспортировка легкой маловязкой нефти. Расходомеры: Точное измерение объема или массы нефти, протекающей по трубопроводу, необходимо для управления технологическим процессом, управления запасами и обнаружения утечек.

В обзоре рассматриваются ротационные реометры и денситометры различных производителей. Эти устройства часто интегрируются в более крупные системы мониторинга и управления, используя проводную или беспроводную передачу данных, ПЛК (программируемые логические контроллеры) и SCADA-системы для анализа в реальном времени, автоматизированного управления и удаленного мониторинга. Известно, что, например, при повышении температуры пласта до 120 °С вязкость нефти с месторождений Мурадханлы и Умбаки снижается примерно на 45–75%. Напряжение сдвига возрастает из-за наличия в высоковязких нефтях высокомолекулярных компонентов, склонных к образованию тиксотропных структур (асфальтенов, парафинов). Вязкость сильно зависит от температуры при транспортировке. Контроль и регулирование температуры необходимы для поддержания оптимальных реологических характеристик и предотвращения застывания и загустения нефти (например, транспортировка асфальта требует температур около 200 °С). В связи с этим вопрос энергосбережения и автоматизации процессов актуален для данной отрасли экономики.

**Ключевые слова:** высоковязкая нефть, реология, контроль данных, транспортировка, современные методы, оборудование, тиксотропные структуры.

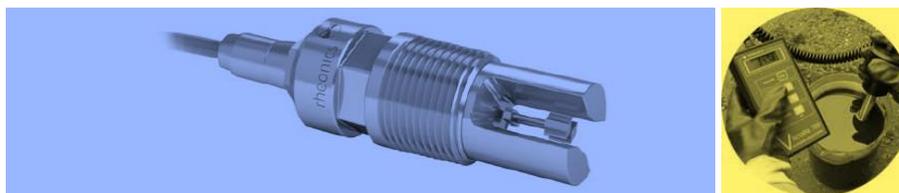
**Введение.** Сегодня, несмотря на попытки замены двигателей внутреннего сгорания электродвигателями, человечество продолжает быть связанным с добычей и переработкой углеводородного сырья. Однако активные запасы легкой маловязкой нефти постепенно сокращаются, и вопрос поддержания высокого уровня добычи сырья на старых нефтегазовых месторождениях остается актуальным [1]. В связи с этим проводится поэтапный ввод в эксплуатацию месторождений высоковязкой нефти и природных битумов [2]. В настоящее время для исследования реологических свойств высоковязкой нефти и природных битумов могут быть использованы следующие приборы. Для этих типов нефтей могут быть использованы хорошо зарекомендовавшие себя плотномеры компаний Rheonics и Anton [3].

**Постановка проблемы.** Измерительная система в основном состоит из ряда пьезоэлектрических преобразователей, расположенных по окружности трубы, а для решения обратной задачи применяется томографический алгоритм. В данной работе гибридный подход используется для корреляции ультразвуковых данных с вязкостью для измерения качества сложной смеси в ходе непрерывного процесса. Информация с датчика используется для коррекции движения при обнаружении отклонения от заданного значения. В данной работе томографический ультразвуковой измеритель скорости применяется для получения реологической кривой неньютоновской жидкости. Необработанные ультразвуковые сигналы обрабатываются с использованием подхода, основанного на анализе главных компонент и нейронных сетях прямого распространения. Полученные данные с датчика подключаются к системе поддержки принятия решений на основе данных для управления технологическим процессом. В настоящее время наблюдается нехватка коммерческих датчиков, способных предоставлять информацию в режиме реального времени о реологических свойствах и профилях скорости неньютоновских жидкостей в промышленных условиях. Лабораторные измерения часто неточно отражают динамические и жесткие условия трубопровода, такие как резкие перепады температур и высокие давления, что приводит к неточным прогнозам поведения потока.

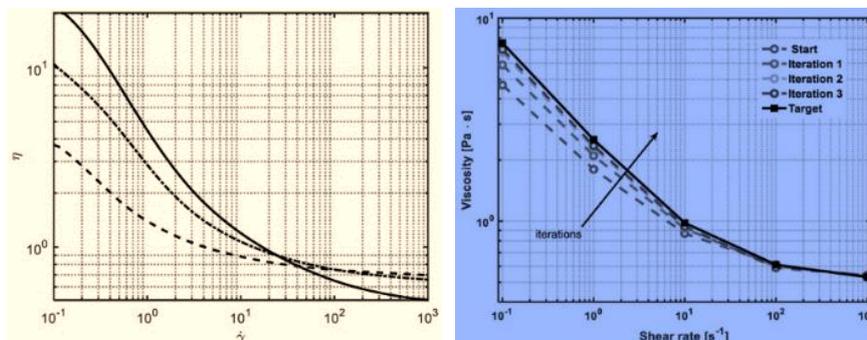
### **Методы решения**

**Вариант 1.** Передовые технологии часто используют модели машинного обучения, такие как искусственные нейронные сети, для обработки данных датчиков для точного прогнозирования и контроля. Используют датчики давления на разных вертикальных высотах для расчета гидростатического давления и кажущейся плотности смеси. Хотя для детального анализа (например, динамической вязкости, упругости) по-прежнему используются передовые лабораторные методы, такие как современные реометры, «поточные» методы становятся все более важными для непрерывного мониторинга транспортировки.

Для транспортировки высоковязких нефтей и природных битумов диапазон измерения плотномеров и датчиков плотности должен составлять от 0 до  $1,45 \text{ г/см}^3$  с учетом наличия воды в продукте. Внешний вид датчика плотности показан на рисунке (рис. 1). Датчики такого типа, представленные на рис. 1, требуют специальных схем регистрации и сбора данных, а также их хранения. Добыча высоковязкой нефти на месторождениях Мурадханлы и Умбаки часто связана с многофазными потоками (нефть, газ, вода). Для измерения плотности смеси и фазового состава используются многофазные расходомеры и специализированные плотномеры (например,  $\Delta P$ -метры или некоторые кориолисовы измерители). Чтобы показать, что реологические свойства могут существенно различаться в зависимости от условий процесса и что зависимость между концентрацией ингредиентов и кривой вязкости не играет существенной роли, на рис. 2 приведены некоторые репрезентативные кривые концентрации различных ингредиентов.

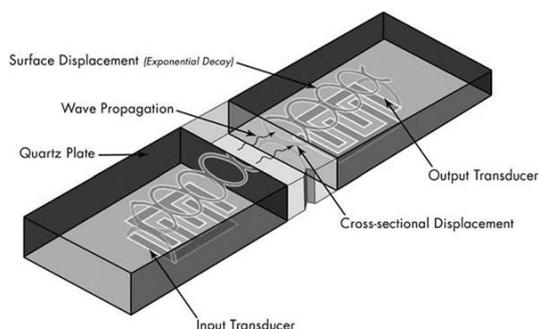


**Рисунок 1. – Определение реологических параметров нефти с помощью датчика DVP**



**Рисунок 2. – Зависимость вязкости и концентрации различных ингредиентов**

**Вариант 2.** Другим важным устройством для контроля реологических свойств являются приборы для измерения кинематической вязкости. Механический элемент (например, камертон) вибрирует внутри жидкости; изменения резонансной частоты и затухания коррелируют с плотностью и вязкостью. Вязкость продуктов в хранилищах и на объектах транспортировки может измеряться как методом отбора проб и анализа, так и в автоматизированном режиме. На рисунке 3 представлены датчики Anton.



**Рисунок 3. – Датчики в высоковязкой нефти с течением времени и в режиме транспортировки**

Данные приборы могут использоваться как в режиме визуального наблюдения операторами приборов контроля кинематической вязкости, так и для автоматизированных измерений с записью данных на персональный компьютер или сервер. Одним из наиболее распространенных испытаний является определение начального напряжения сдвига при течении нефти. Эксперимент проводится с использованием этого метода. В стакан вискозиметра (если это серийные вискозиметры или аналогичные приборы) помещают определенный объем пробы нефти Мурадханлы и термостатируют до необходимой температуры. Затем в роторе включают режим управления напряжением сдвига и устанавливают пределы увеличения напряжения сдвига в роторе вискозиметра.

**Обсуждение и результаты.** Приборы такого типа часто используются для исследования тиксотропных свойств высоковязких нефтей. Образец тяжелой нефти помещается в вискозиметр и термостатируется при необходимой температуре испытания. Таким образом, исследование тиксотропных свойств высоковязкой нефти данным методом испытаний при одной температуре занимает 25 минут, не считая подготовки образца и транспортировки в лабораторию. Если же речь идет о полноценном исследовании, то при изучении реологии 1 образца нефти необходимо затратить не менее 2 часов, прибавляя время, необходимое термостату прибора для проведения 7-8 испытаний и. Поэтому рационально проводить такие испытания при необходимости. Он измеряет время, необходимое для протекания фиксированного объема масла через капиллярную трубку под действием силы тяжести при заданной температуре (обычно 45 °С и 100°С). Этот метод является стандартным для ньютоновских жидкостей, таких как обычные масла, но менее эффективен для сложных свойств очень высоковязких неньютоновских масел. Для исследования реологии некоторых нефтей требуется предварительный подогрев перед началом работы, например, нефть месторождений Мурадханлы и Умбаки содержит большое количество парафина, что существенно затрудняет ее транспортировку и хранение.

**Закключение.** Решение проблем, возникающих при изменении реологических свойств добываемых и транспортируемых нефтей, является актуальной задачей в современных условиях транспортировки и хранения высоковязких нефтей. При этом хранение данных в цифровом виде позволит собирать и анализировать данные, полученные в ходе испытаний. Эти модели могут быть обучены на данных датчиков и способны прогнозировать реологические свойства, такие как пластическая вязкость, предел текучести и кажущаяся вязкость, в режиме реального времени. Модели, управляемые данными: обрабатывая большие массивы данных с датчиков, эти модели могут оказывать поддержку в принятии решений и вносить коррективы при обнаружении отклонений от заданных значений. Успешная транспортировка высоковязкой нефти месторождения Мурадаханлы и Умбаки основана на интегрированной системе мониторинга, сочетающей передовые сенсорные технологии с обработкой данных и моделированием. Поточные измерительные приборы в режиме реального времени, такие как крутильные резонаторные вискозиметры и плотномеры, обладают преимуществами по сравнению с традиционными автономными лабораторными методами, предоставляя непрерывные данные для мгновенного контроля и оптимизации процесса. Комбинируя данные датчиков с прогнозными моделями, операторы могут управлять процессом для поддержания требуемых реологических свойств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алескеров Г.А., Сулейманлы Я.Б., Рустамзаде Дж.С., «Метод расчета конвективной диффузии при последовательном транспорте высоковязкой нефти», Научно-издательский центр «L-Journal», 2024.
2. Гурбанов Г.Р., Гасымзаде А.В., Аббасова Л.А., «Исследование влияния различных методов на реологические свойства высокопарафинистой нефти», В «Опросы химии и химической технологии», 2025.
3. Алескеров Г.А., Сулейманлы Я.Б., «Метод колонково-кольцевого течения для транспортировки высоковязкой нефти и повышения эффективности транспортировки тяжелых нефтяных эмульсий в условиях холода», «Оборудование, технологии, материалы», 2024.
4. Гурбанов, Г.Р., Гасымзаде, А.В., Аббасова, Л.А., «Исследование влияния комбинированных методов на реологические свойства высокопарафинистых нефтей», *Nafta Gaz*, 2024, 80(7), с. 427–433.
5. Матиев К.И., Ага-заде А.Г., Алсафарова М.Э., «Депрессорная присадка для высокопарафинистых нефтей», «SOCAR Proceedings», 2018, №3, с. 32–37.