

ВАК 25.00.19:25.00.30

УДК 665.613.22: 532.135-026.732(470.13)

## **Нестационарные свойства кривых течения аномальных нефтей Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции Некучаев В. О.<sup>1</sup>, Соколов А. А.<sup>2</sup>**

Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта

*В работе проведены экспериментальные исследования тиксотропных свойств высокопарафинистой нефти Кыртаёльского месторождения и высоковязкой битуминозной нефти Уса пермо-карбон. Записаны кривые течения для разных температур, зафиксированы петли гистерезиса и построены зависимости площади петель, характеризующие степень тиксотропности, от температуры. Экспериментально реализован наглядный метод измерения нестационарных параметров тиксотропных нефтей с помощью импульсно-прерывистого режима деформирования образца нефти и записи кривой течения.*

**Ключевые слова:** реология, тиксотропия, вязкость.

## **Nonstationary properties of the flow curves of anomalous oils Nekuchaev V. O., Sokolov A. A.**

Ukhta State Technical University, Ukhta

*Experimental studies of the thixotropic properties of the high-paraffin oil of the Kyrtaayolskoe field and the high-viscosity bituminous oil Usa permo-carbon field were carried out in the work. Flow curves for different temperatures are recorded, hysteresis loops are fixed, and loop area dependences, characterizing the degree of thixotropy, are plotted against temperature. An experimental method for measuring nonstationary parameters of thixotropic oils using a pulse-intermittent method of deformation of an oil sample and recording a flow curve was experimentally realized.*

**Keywords:** rheology, thixotropy, viscosity.

### **Введение**

В настоящей работе проведены лабораторные исследования нестационарных реологических свойств высокопарафинистой нефти Кыртаёльского месторождения и нефти пермо-карбоновой залежи Усинского месторождения Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Кроме традиционной методики записи кривых течения апробирован прерывистый «импульсный» режим снятия зависимости напряжения сдвига от времени при определённой скорости деформирования. С помощью этих методик изучены тиксотропные свойства нефтей.

<sup>1</sup> Соколов Антон Андреевич – студент 2 курса направления проектирования и эксплуатации магистральных газонефтепроводов Ухтинского государственного технического университета.

<sup>2</sup> Некучаев Владимир Орович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующей кафедрой физики Ухтинского государственного технического университета.

## Теоретический анализ

Тиксотропия – явление постепенного уменьшения вязкости структурированной системы при постоянной скорости сдвиговой деформации и постепенное увеличение вязкости при снятии деформирующих напряжений. Причина – разрушение и восстановление пространственных структур внутри нефти при деформировании и снятии напряжения соответственно. На зависимостях напряжения сдвига от скорости сдвига проявляется в виде петли гистерезиса. Эти петли позволяют найти мощность, приходящуюся на единицу объёма, которую нужно затратить на разрушение пространственных структур, хотя все результаты относительные, так как зависят от методики эксперимента. Размерность площади гистерезиса  $\left[\frac{\text{Па}}{\text{с}}\right] \rightarrow \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}\right]$ .

В данной работе также определяли энергию активации вязкого течения исследуемых нефтей. Согласно теории Френкеля, Аррениуса и Эйринга, эта величина определяет удельную кинетическую энергию, которую нужно передать молекулам, чтобы они перешли из одного равновесного состояния в другое внутри вещества. По формуле Френкеля–Эйринга:

$$\mu = A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \rightarrow \ln(\mu) = \ln(A) + \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T}$$

Если перестроить зависимость вязкости от температуры в координатах Аррениуса, можно аппроксимировать полученную кривую одним либо несколькими прямыми отрезками и определить энергию активации  $E_a$  для каждого отрезка как тангенс угол наклона.

## Экспериментальная часть

В таблице 1 приведён компонентный состав указанных ранее нефтей.

Нефть Кыртаэльского месторождения является высокопарафинистой нефтью, поэтому для неё характерно явление тиксотропии. При снижении температуры ниже температуры массовой кристаллизации в данной нефти образуется пространственная структура из твёрдых парафиновых углеводородов. На графике в координатах Аррениуса, изображённом на рисунке 1, эта температура соответствует левой точке перегиба  $35^\circ\text{C}$ .

На рисунке 1 по оси абсцисс отложена величина  $1000/T$ , а по оси ординат отложен логарифм вязкости, выраженной в мПа. На графике точка перегиба справа является переходом в однофазовое состояние, что сильно уменьшает энергию активации течения.

Таблица 1. Компонентный состав нефтей

Нефть месторождения	Состав	
Кыртаэльское	смолы – 5,15 % асфальтены – 0,72 %	сера – 0,29 % парафины – 15,95 %
Усинское, пермо-карбоновая залежь	смолы – 23,14 % асфальтены – 8,91 %	сера – 2,3 % парафины – 2,39 %

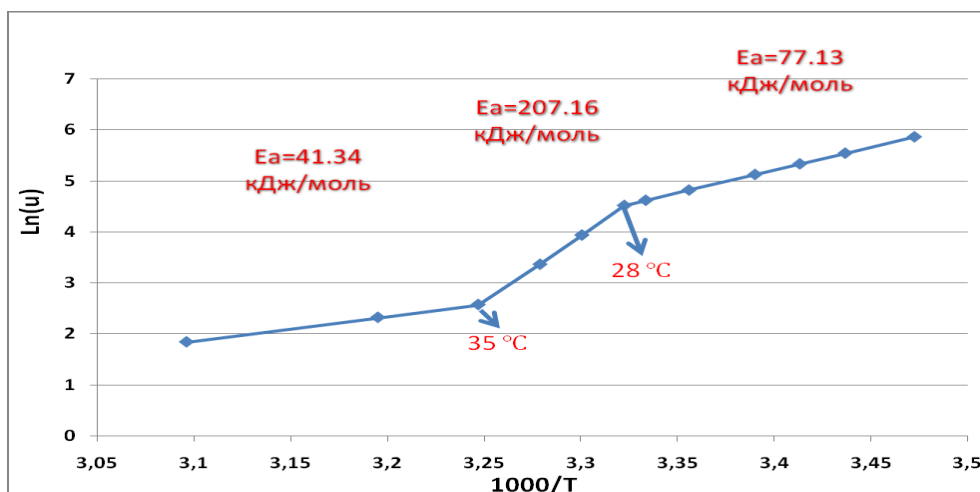


Рисунок 1. График зависимости вязкости от температуры в координатах Аррениуса

Как мы видим из рисунка 2, площадь гистерезиса начинает резко увеличиваться, начиная с температуры массовой кристаллизации, что опять же, объясняется образованием структур внутри нефти. До температуры массовой кристаллизации петля гистерезиса проявляется слабо, но она всё же есть до температур 35–40 градусов, совпадающих с температурами плавления малой, но значимой части тугоплавких парафинов.

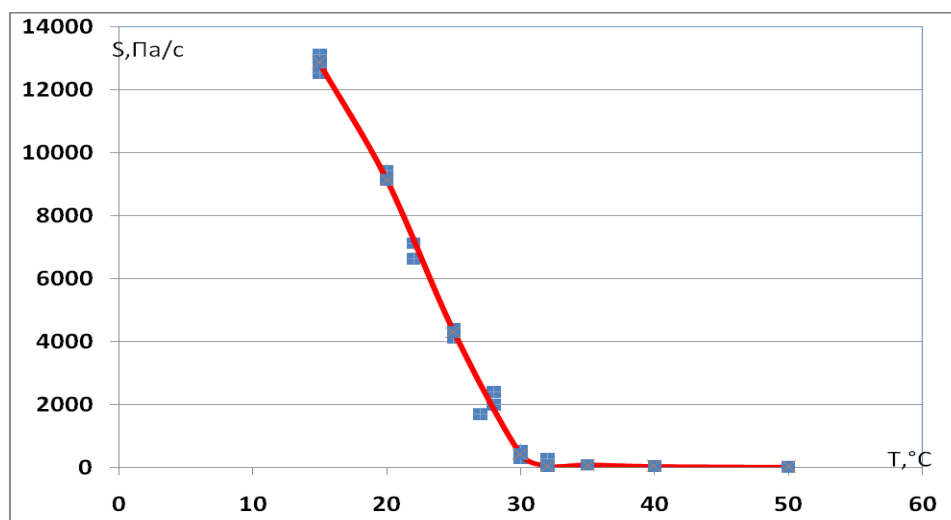


Рисунок 2. График зависимости площади гистерезиса от температуры для нефти Кыртаёльского месторождения

На рисунке 3 приведён график примера петли гистерезиса для Кыртаёля (кривые течения с температурами выше и ниже температуры массовой кристаллизации).

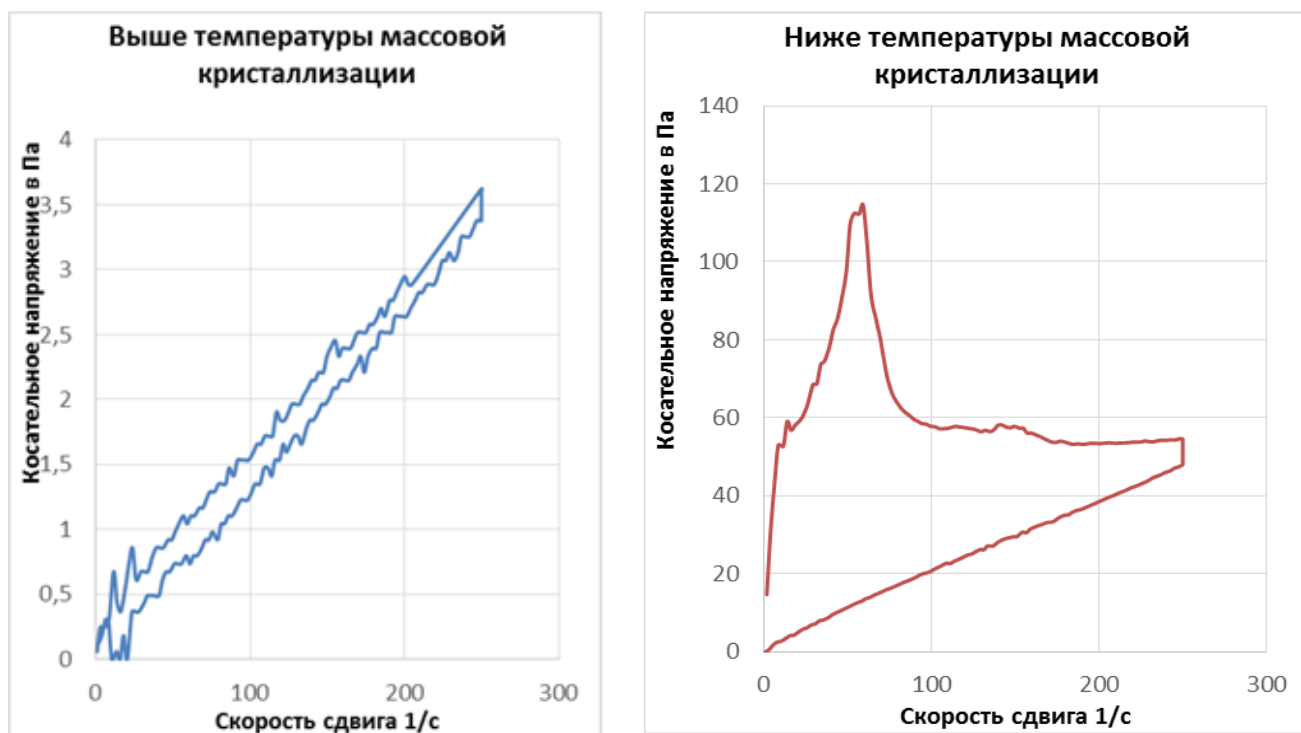


Рисунок 3. Кривые течения при температурах выше и ниже температуры массовой кристаллизации

Нефть Усинского месторождения пермо-карбоновой залежи не является высокопарафинистой нефтью, но для неё также может наблюдаться явление тиксотропии (рис. 4).

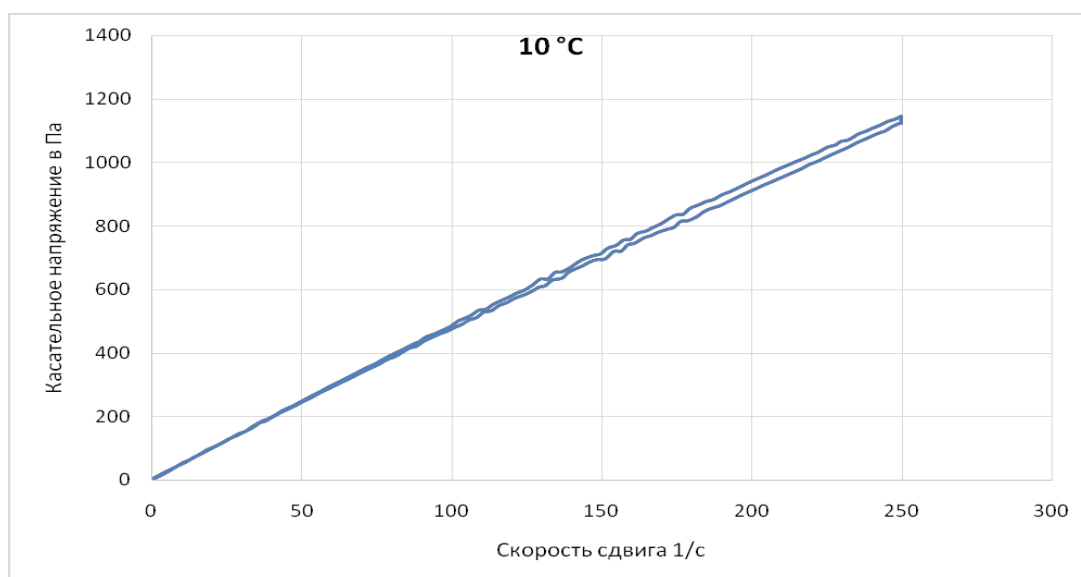


Рисунок 4. График кривой течения нефти Усинского месторождения

Для данной нефти явление тиксотропии обуславливается другими веществами, а именно структурообразующими асфальтенами и смолами, обеспечивающими высокую вязкость. «Активация» этих веществ в реологическом смысле не сопровождается особыми фазовыми переходами, как видно на рисунке 5.

В то же время, площадь петель гистерезиса довольно быстро увеличивается (рис. 6), что объясняется не массовым структурообразованием, а увеличением абсолютной вязкости в результате высокого содержания внутри нефти асфальтенов и смол. Таким образом, тиксотропные свойства высоковязких нефтей, в сравнении с высокопарафинистыми нефтями, выражены заметно слабее при одних и тех же температурах.

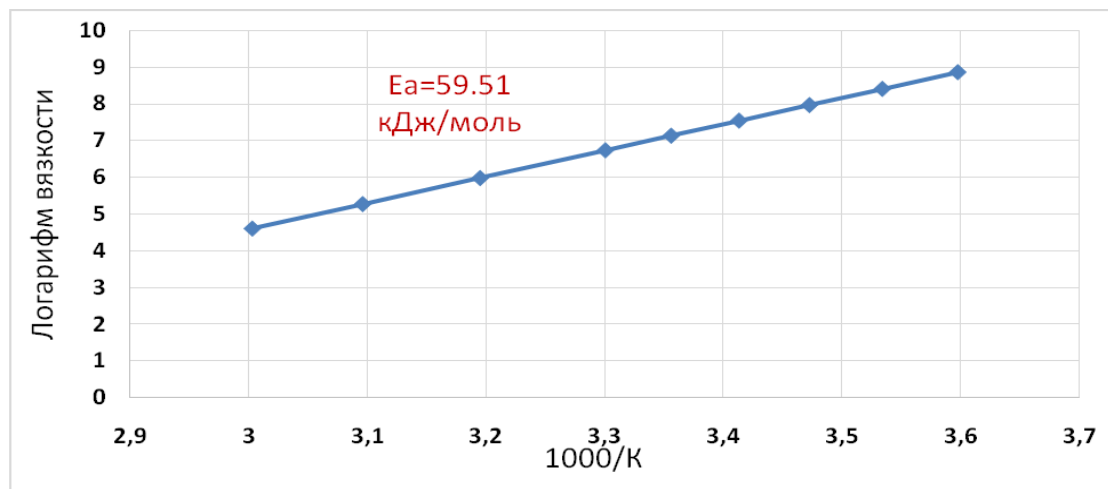


Рисунок 5. График зависимости вязкости от температуры в координатах Аррениуса для нефти Усинского месторождения

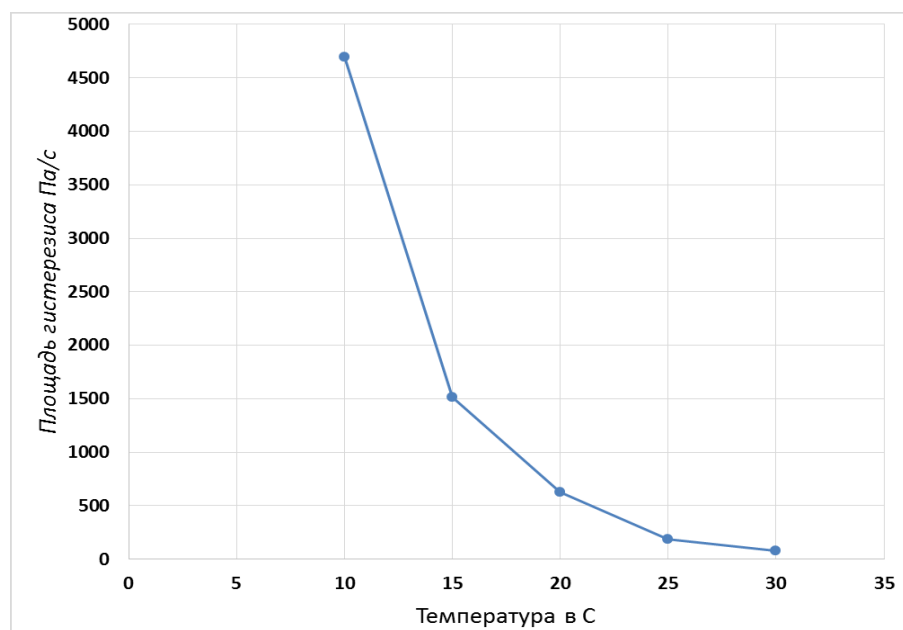


Рисунок 6. График зависимости площади гистерезиса на кривой течения от температуры для нефти Усинского месторождения

Далее в работе был реализован прерывистый «импульсный» режим снятия напряжения сдвига от времени для нефти Кыртаёльского месторождения при постоянной скорости деформирования. Методика эксперимента состоит из следующих пунктов:

- 1) термообработки нефти при 87°С;
- 2) термостатирования в течении 40 мин.;

3) запуска режима деформирования образца нефти на ротационном вискозиметре с постоянной заданной скоростью сдвига в течение 60 сек. и остановки этого деформирования в течение 60 сек. с повтором всего цикла дважды;

4) заключительного цикла деформирования на ротационном вискозиметре с постоянной скоростью сдвига в течение 10 мин.

Этот режим позволил оценить скорость восстановления структур внутри нефти и скорость её выхода на «стационарное» значение вязкости. Рисунки 7, 8 наглядно показывают полученные результаты.

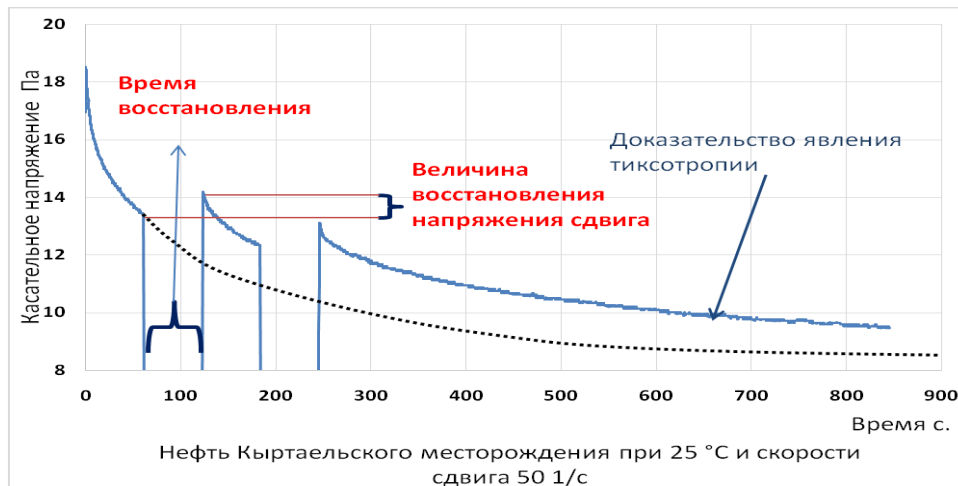


Рисунок 7. График зависимости касательного напряжения сдвига от времени для нефти Кыртаельского месторождения при скорости сдвига 50 1/с

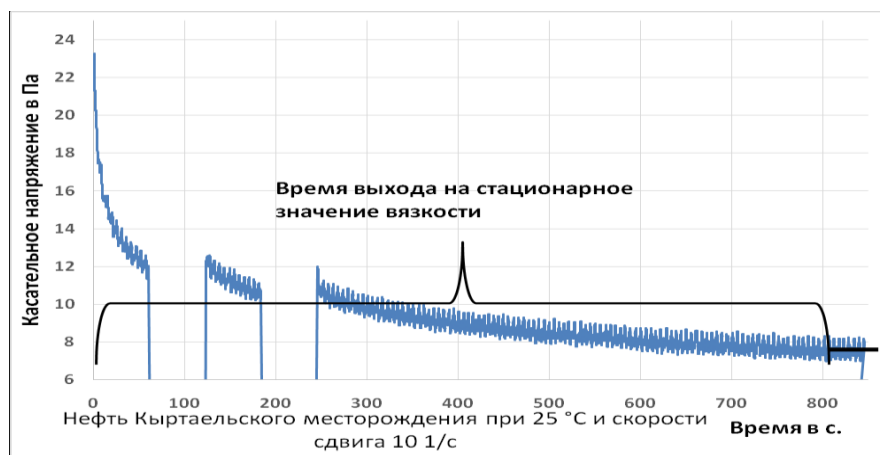


Рисунок 8. График зависимости касательного напряжения сдвига от времени нефти Кыртаельского месторождения при скорости 25 1/с

## Выводы

В данной работе подтверждено, что явление тиксотропии для высокопарафинистых нефтей обусловлено кристаллизацией парафиновых углеводородов при снижении температуры, а в высоковязких малопарафинистых нефтях также может наблюдаться это явление, обусловленное высоким содержанием смол и асфальтенов.

Для парафинистых нефтей характерны одна или более точек перегиба на графике зависимости вязкости от температуры в координатах Аррениуса, в то

время как эти зависимости для высоковязких нефтей не имеют точек перегиба, что говорит об отсутствии соответствующих фазовых переходов.

В работе реализован импульсный «прерывистый» режим деформирования образца нефти («вращение-остановка-вращение-.....»), позволяющий наглядно наблюдать нестационарные свойства нефти, измерять скорость восстановления структур в состоянии покоя и измерять скорость выхода нефти на равновесное состояние при деформировании.

### Список литературы

1. Хасанов М. М., Булгакова Г. Т. Нелинейные и неравновесные эффекты в реологически сложных средах. Москва–Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2003. 288 с.
2. Малкин А. Я., Исаев А. И. Реология: концепции, методы, приложения; пер. с англ. СПб. : Профессия, 2007. – 560 с., ил.
3. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии; пер. с англ. – М. : КолосС, 2003. 312 с.
4. Васенева А. А., Некучаев В. О. Особенности реологических кривых течения высоковязких нефтей и их водных эмульсий // Нефтяное хозяйство, 2013. № 8. С. 61–63.

### List of reference

1. Khasanov, M. M., Bulgakova, G. T., *Nonlinear and non-equilibrium effects in rheologically complex media*, Moscow–Izhevsk, Institute for Computer Research, 2003, 288 p.
2. Malkin, A. Ya., Isaev, A. I., trans. with English, *Rheology: concepts, methods, applications*, St. Petersburg, Profession, 2007, 560 p., ill.
3. Shramm, G., *Fundamentals of practical rheology and rheometry*, trans. with English, Moscow, KolosS, 2003, 312 p.
4. Vaseneva, A. A., Nekuchaev, V. O., “Features of rheological curves of the flow of high-viscosity oils and their aqueous emulsions”, *Oil industry*, 2013, no. 8. pp. 61–63.