

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-12-45-49

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ АНОМАЛЬНЫХ НЕФТЕЙ С ПОМОЩЬЮ РОТАЦИОННОГО И ВИБРАЦИОННОГО ВИСКОЗИМЕТРОВ

© Владимир Орович Некучаев, Михаил Михайлович Михеев,
Денис Михайлович Михеев

Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия; e-mail: vnekuchaev@ugtu.net

*Статья поступила 9 февраля 2018 г. Поступила после доработки 23 марта 2018 г.
Принята к публикации 29 марта 2018 г.*

Приведены результаты исследований вязкости ньютоновских и неньютоновских нефтей, полученные с помощью ротационного (HAAKE VT550) и вибрационного (SV-10) вискозиметров. Показано, что при измерении вязкости ньютоновских жидкостей, в том числе легких неструктурированных нефтей, в области температур, где неньютоновские свойства не проявляются, ротационный и вибрационный вискозиметры дают схожие значения вязкости и зависимости вязкости от температуры. При снижении температуры парафинистой или высоковязкой нефти до диапазона проявления аномальных свойств каждое измеренное на вибровискозиметре SV-10 значение вязкости соответствует своей эффективной скорости сдвига на кривой течения для данной температуры, полученной с помощью ротационного вискозиметра VT550 (чем больше вязкость, тем меньше эффективная скорость сдвига). Поэтому при изучении реологии неньютоновских структурированных жидкостей, например, высокопарафинистых нефтей, следует использовать ротационные реометры, позволяющие записывать кривые течения в полном объеме и определять значения вязкости в переходных и установившихся режимах течения. Вибрационный вискозиметр измеряет вязкость неньютоновских структурированных сред для некоторых «эффективных» значений скоростей сдвига, которые самим прибором не задаются, а могут быть определены в результате отдельных экспериментов с калиброванными образцами. Поэтому в данном случае возможны только относительные, а не абсолютные измерения. По полученным данным исследования реологических характеристик нефти на двух типах приборов предложены рекомендации к практическому применению вибровискозиметра SV-10.

Ключевые слова: вибрационный вискозиметр; ротационный вискозиметр; температурная зависимость вязкости; скорость сдвига; неньютоновские жидкости; парафинистые нефти; энергия активации; кривая течения.

STUDY OF THE TEMPERATURE DEPENDENCES OF ABNORMAL OIL VISCOSITY USING ROTATIONAL AND VIBRATIONAL VISCOMETERS

© Vladimir O. Nekuchaev, Mikhail M. Mikheev, Denis M. Mikheev

Ukhta State Technical University, Ukhta, Russia; e-mail: vnekuchaev@ugtu.net

Received February 9, 2018. Revised March 23, 2018. Accepted March 29, 2018.

Principle of operation, advantages and disadvantages of the recently introduced a vibrational viscometer SV-10 are discussed. The results of measuring the viscosity of Newtonian and non-Newtonian oils on a HAAKE VT550 rotary viscometer are compared with that obtained on a vibratory viscometer in the temperature range wherein the non-Newtonian properties of oil appear and disappear. It is shown that when measuring the viscosity of Newtonian liquids, including light unstructured oils, in the temperature range where non-Newtonian properties are not manifested, the rotational and vibrational viscometers provide similar results regarding both the viscosity values and temperature dependence of the viscosity. However, when the oil temperature drops to the range of the abnormal properties, each value of the oil viscosity measured on SV-10 corresponds to the effective shear rate on the flow curve for a given temperature recorded on a rotational viscometer VT550 (the higher the viscosity, the smaller the effective shear rate). Hence, when studying the rheology of non-Newtonian structured liquids, e.g., high-paraffin oils, it is necessary to use rotational rheometers, which provide recording the entire flow curve and determining the viscosity values in transient and steady-state flow regimes. The vibration viscometer measures the viscosity of non-Newtonian structured media for some “effective” shear rate values, which are not set by the device and can be determined as a result of separate experiments with calibrated samples thus providing relative rather than absolute measurements of the viscosity. Recommendations for practical use of SV-10

vibrational viscometers are specified proceeding from the results of studying the rheological characteristics of oils obtained on both types of the viscometers.

Keywords: vibratory viscometer; rotational viscometer; temperature dependence of viscosity; shear rate; non-Newtonian liquids; paraffinic oils; activation energy; flow curve.

Известно, что высокопарафинистые и высоковязкие нефти при понижении температуры проявляют выраженные неньютоновские свойства (зависимость вязкости от скорости сдвига, наличие статического и динамического напряжений сдвига, тиксотропность и др.). Такие нефти еще называют аномальными, т.е. не подчиняющимися закону вязкого трения Ньютона.

Для теплогидравлических расчетов неизоотермических магистральных нефтепроводов (МН), контроля технологических режимов и обеспечения безопасности перекачки неньютоновских нефтей необходим регулярный мониторинг основных реологических параметров проб, отобранных в разных точках по длине трубопровода. Подобный мониторинг осуществляют с использованием вискозиметров.

В настоящее время наиболее распространены ротационные вискозиметры [1], которые дают наиболее полную информацию о реологических параметрах исследуемых жидкостей (особенно для различного типа аномальных нефтей): записывают кривые течения на прямом и обратном ходах, определяют соответствующие значения эффективной и пластической вязкостей, началь-

ные статическое и динамическое напряжения сдвига для разных температур.

Вибрационные вискозиметры, в отличие от ротационных, используют принцип камертонной вибрации [2, 3], позволяющий измерять вязкость в широком диапазоне значений (от 0,3 до 10 000 мПа · с) без замены сенсорных пластин с высокой повторяемостью (1 %).

Цель работы — исследование вязкости аномальных нефтей в области проявления как чисто ньютоновских, так и неньютоновских свойств с помощью ротационного (НААКЕ VT550) и вибрационного (SV-10) вискозиметров.

Отметим, что при вибрационном методе измерения [1, 2] в качестве измеряемой величины получают произведение динамической вязкости на плотность исследуемой жидкости — «статическую» вязкость [3]. Это справедливо для ньютоновских жидкостей (подчиняющихся закону вязкого трения Ньютона): маловязких жидкостей, легких нефтей, нефтей с малым содержанием парафина, нефтей с заметным содержанием парафина при температурах выше температуры начала его кристаллизации.

Исследовали моторное масло (ньютоновская жидкость). Образец сначала нагревали до 30 °С, затем охлаждали до 10 °С. Скорость охлаждения, как и во всех следующих опытах, составляла 10 °С/ч.

На рис. 1 приведены зависимости динамической вязкости (μ) от температуры (T) и логарифма вязкости ($\ln \mu$) от обратной температуры (координаты Аррениуса [4]), полученные на вискозиметрах SV-10 и VT550 (здесь и далее параллельно с измерениями на SV-10 для нахождения вязкости определяли плотность жидкости).

По тангенсам углов наклона прямых 1 и 2 определяли энергию активации образца: 32 (для SV-10) и 31 кДж/моль (для VT550). Видно, что энергии активации, полученные на обоих вискозиметрах, практически совпадают.

Далее исследовали образцы нефтей, транспортируемых по МН «Уса — Ухта» и «Ухта — Ярославль» (нефть I и нефть II). Параметры образцов представлены в таблице.

На рис. 2 приведены температурные зависимости вязкости нефти II и зависимости вязкости от температуры в координатах Аррениуса, измеренные на вибрационном и ротационном вискозиметрах.

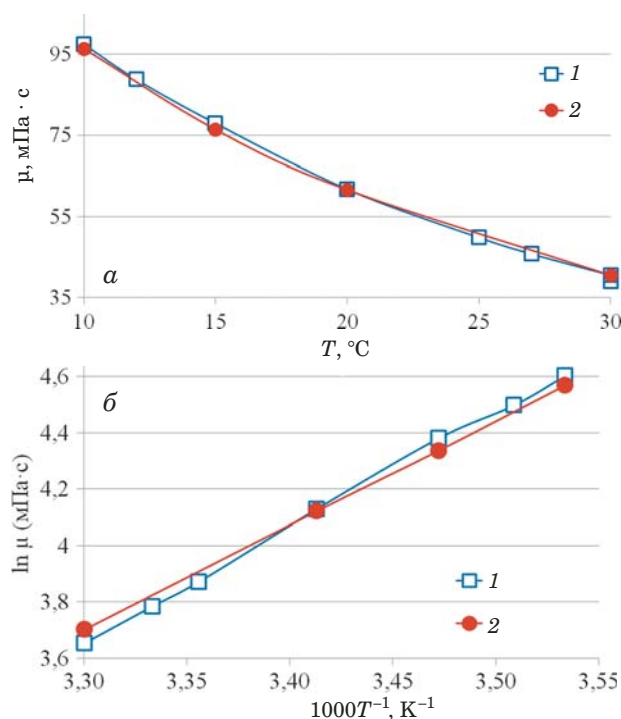


Рис. 1. Зависимости вязкости моторного масла от температуры (а) и логарифма вязкости от обратной температуры (б), полученные на SV-10 (1) и VT550 (2)

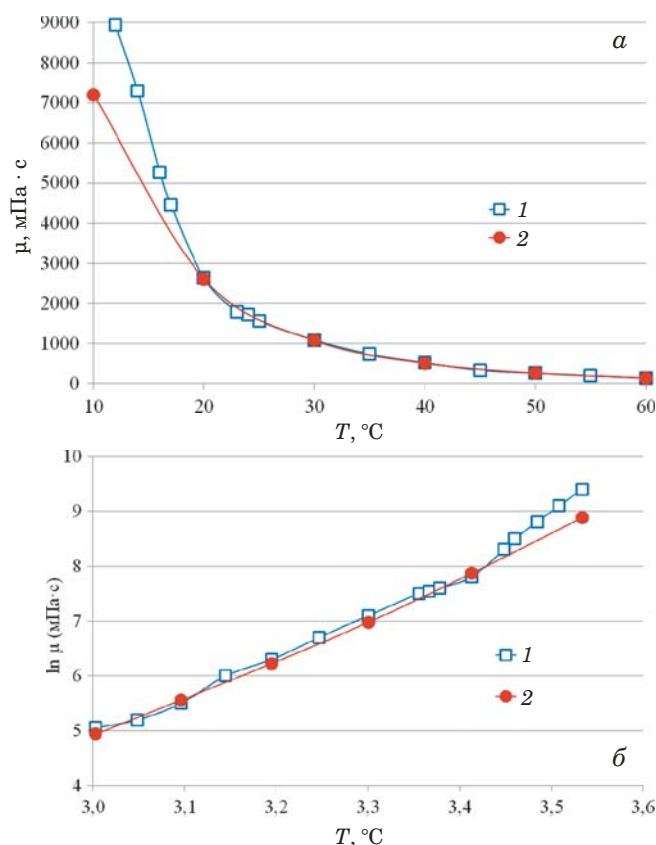


Рис. 2. Зависимости вязкости нефти II от температуры (а) и логарифма вязкости от обратной температуры (б), полученные на SV-10 (1) и VT550 (2)

Видно, что в области 20 – 60 °С, где образец ведет себя как ньютоновская жидкость, значения вязкости для обоих вискозиметров достаточно близки. Однако при понижении температуры они начинают существенно различаться, что отражается, естественно, и на энергии активации.

На рис. 3 представлены зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига (кривые течения) при разных температурах образца неньютоновской парафинистой нефти.

В таких нефтях при температуре ниже температуры массовой кристаллизации парафиновых углеводородов (УВ) из последних образуется пространственная структурная сетка, определяющая

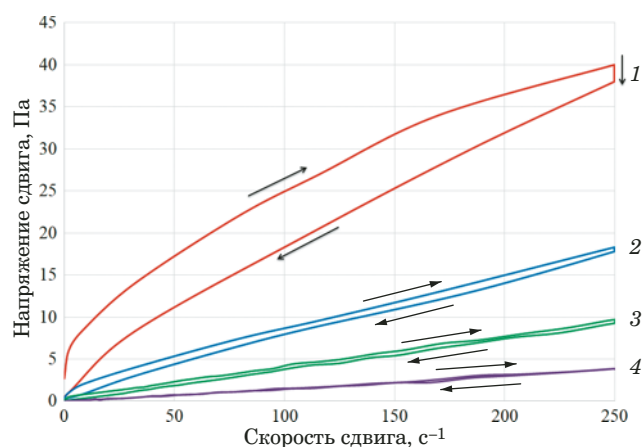


Рис. 3. Кривые течения нефти I, измеренные на вискозиметре VT550 при температурах 10 (1), 16 (2), 20 (3) и 30 °С (4) (стрелками показаны прямой и обратный ходы вискозиметра)

аномальные свойства нефтей: нелинейность кривой течения, зависимость вязкости от скорости сдвига, вязкопластичные свойства, наличие тиксотропии (кривая прямого хода вискозиметра расположена выше кривой обратного хода). Особенно ярко аномальные свойства проявляются при низкой температуре, когда может наблюдаться явление сверханомалии вязкости [5, 6].

Далее сравнивали температурные зависимости вязкости нефти I, полученные на ротационном и вибрационном вискозиметрах. Значения эффективной вязкости (VT550) определяли для разных скоростей сдвига (ось вязкости представлена в логарифмическом масштабе) (рис. 4).

Видно, что температурные зависимости для SV-10 и VT550 хорошо совпадают в области ньютоновского течения (для температур 30 – 50 °С), где вязкость практически не зависит от скорости сдвига. В области более низких температур кривая вязкости, полученная на SV-10, более всего соответствует кривой эффективной вязкости, полученной на VT550 для прямого хода, и скорости сдвига 0,5 с⁻¹. Для обратного хода в области неньютоновского течения такого совпадения не наблюдается.

Параметры нефтей I и II

Параметр	Нефть I	Нефть II
Плотность при 20 °С, кг/м ³	860 – 865	942 – 945
Вязкость динамическая при 20 °С, мПа · с	30 – 40	2500 – 3200
Содержание парафина, % масс.	8 – 10	0,5 – 2,21
Содержание асфальтенов, % масс.	2 – 3,4	2,3 – 3,25
Содержание смол, % масс.	7,7 – 14,5	20 – 25
Температура начала структурообразования, °С	19 – 21	—
Температура застывания, °С	8 – 15	–18

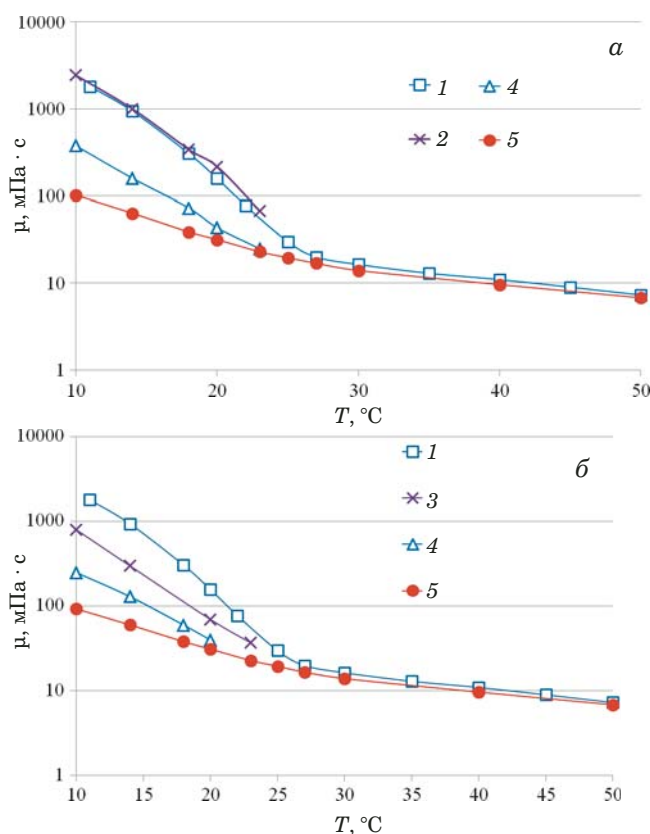


Рис. 4. Температурные зависимости вязкости нефти I, измеренные на SV-10 (1) и VT550 при скоростях сдвига 0,5 (2), 0,1 (3), 8 (4) и 250 с⁻¹ (5): а и б — прямой и обратный ход кривой течения

Можно сделать вывод, что значения вязкости аномальных тиксотропных жидкостей, измеренные по методике вибрационного вискозиметра, гораздо более соответствуют эффективным значениям вязкости, рассчитанным из прямого хода кривой течения ротационного вискозиметра, чем из обратного.

В ротационном вискозиметре при деформировании жидкой структурированной дисперсной системы, например, парафинистой нефти, при последовательном увеличении скорости сдвига на прямом ходе структура нефти не успевает разрушаться до равновесного состояния, что, собственно, и является причиной появления петли гистерезиса. Обратный ход вискозиметра при достаточном времени вращения цилиндра на конечной скорости сдвига соответствует течению жидкости с разрушенной структурой и, соответственно, с меньшей вязкостью. Поскольку вибровискозиметр использует тонкие сенсорные пластины, то деформации структуры образца не происходит. Фактически в вибрационном вискозиметре отсутствует сдвиговое течение нефти с разрушенной структурой, как это имеет место при обратном ходе в ротационном реометре.

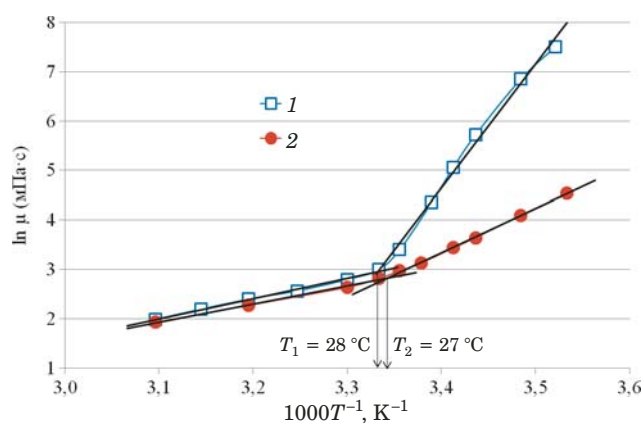


Рис. 5. Зависимости вязкости от температуры в координатах Аррениуса для нефти I, измеренные на SV-10 (1) и VT550 (2)

На основе температурных зависимостей вязкости парафинистых нефтей, полученных на вибрационном и ротационном вискозиметрах, рассчитывали энергии активации установившегося течения и температуры начала массовой кристаллизации [7, 8]. При этом точки пересечения прямых аппроксимации соответствуют температуре начала массовой кристаллизации парафинов в нефти (рис. 5).

Энергия активации для нефти I: в области ньютоновского течения (для температур выше температуры начала кристаллизации парафинов) — 34 (SV-10) и 30 кДж/моль (VT550) (скорость сдвига 250 с⁻¹); в области низких температур — 208 (SV-10) и 73 кДж/моль (VT550). Температуры начала массовой кристаллизации составили: $T_1 = 28$ (SV-10) и $T_2 = 27$ °C (VT550).

Видно, что отклонения значений энергии активации для низких температур значительны (результаты, полученные на вибрационном вискозиметре, заметно выше, чем на ротационном). Это связано с методикой виброизмерений вязкости структурированных сред. Фактически при снижении температуры каждое измеренное значение вязкости на SV-10 соответствует какой-то своей эффективной скорости сдвига (чем больше вязкость, тем меньше эффективная скорость сдвига).

Таким образом, проведенные исследования показали, что вибрационный вискозиметр SV-10 как прибор для измерения вязкости обладает рядом несомненных преимуществ: малое количество измеряемой пробы; возможность проводить измерения в реальном масштабе времени; относительно высокая скорость, а значит, массовость измерений; широкий диапазон измерения вязкости; высокая повторяемость результатов. Однако требуется параллельное определение плотности исследуемой жидкости.

При измерении вязкости ньютоновских жидкостей (в том числе легких неструктурированных нефтей) в области температур, где неньютоновские свойства не проявляются, ротационный (VT550) и вибрационный (SV-10) вискозиметры дают схожие результаты. Различия могут быть устранены введением постоянного поправочного коэффициента.

При изучении реологии неньютоновских структурированных жидкостей (например, высокопарафинистых нефтей) следует использовать ротационные реометры, позволяющие записывать кривые течения полностью и определять значения вязкости в переходных и установившихся режимах течения. Вибрационный вискозиметр измеряет вязкость неньютоновских структурированных сред для некоторых «эффективных» значений скоростей сдвига, которые самим прибором не задаются. Их можно определить в ходе отдельных экспериментов с калиброванными образцами. Поэтому в данном случае возможны только относительные, а не абсолютные измерения. Значения вязкости, получаемые на вибрационном вискозиметре для структурированных сред в той области температур, где заметно проявляются их аномальные неньютоновские свойства, соответствуют эффективной вязкости, определяемой на ротационном вискозиметре для малых скоростей сдвига (где еще не наблюдается установившееся течение). В этой области эффективная вязкость, получаемая из кривой течения, заметно падает с увеличением скорости сдвига.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Малкин А. Я., Исаев А. И.** Реология: концепции, методы, приложения. — СПб.: Профессия, 2010. — 560 с.
2. **Соловьев А. Н., Каплун А. Б.** О вибрационном методе измерения вязкости жидкостей / Теплофизика высоких температур. 1965. Т. 3. № 1. С. 139 – 148.
3. **Naoto Izumo, Atsushi Koiwai.** Technological Background and Latest Market Requirements concerning Static Viscosity Measurement with a Tuning-fork Vibration Viscometer / Proceedings of Asia-Pacific Symposium on Measurement of Mass, Force and Torque (APMF2009). 2009. P. 51 – 57.
4. **Виноградов Г. В., Малкин А. Я.** Реология полимеров. — М.: Химия, 1977. — 440 с.
5. **Павлов В. П., Виноградов Г. В.** Обобщенная реологическая характеристика пластичных дисперсных систем / Коллоидный журнал. 1966. Т. 28. № 3. С. 424 – 430.
6. **Некучаев В. О., Васенева А. А.** Особенности реологических кривых течения высоковязких нефтей и их водных эмульсий / Нефтяное хозяйство. 2013. № 8. С. 61 – 63.
7. **Некучаев В. О., Стинич С. И.** Исследование температурной зависимости вязкости и энергии активации течения высокопарафинистых и высоковязких нефтей Тимано-печорской провинции / Проблемы разработки и эксплуатации месторождений высоковязких нефтей и битумов: материалы межрегиональной научно-технической конференции. — Ухта: Изд-во УГТУ, 2015. С. 218 – 221.
8. **Федоров П. В., Некучаев В. О., Пыстин А. А.** Об исследовании влияния термообработки на реологические характеристики высоковязких нефтей, перекачиваемых по МН «Уса-Ухта» и «Ухта-Ярославль» / Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. № 6(26). С. 58 – 63.

REFERENCES

1. **Malkin A. Ya., Isayev A. I.** Rheology: concepts, methods, and applications. — St. Petersburg: Professiya, 2010. — 560 p. [in Russian].
2. **Soloviev A. N., Kaplun A. B.** About vibration method of viscosity measurement of liquids / Teplofiz. Vysok. Temp. 1965. Vol. 3. N 1. P. 139 – 148 [in Russian].
3. **Naoto Izumo, Atsushi Koiwai.** Technological Background and Latest Market Requirements concerning Static Viscosity Measurement with a Tuning-fork Vibration Viscometer / Proceedings of Asia-Pacific Symposium on Measurement of Mass, Force and Torque (APMF2009). 2009. P. 51 – 57.
4. **Vinogradov G. V., Malkin A. Ya.** Rheology of polymers. — Moscow: Khimiya, 1977. — 440 p. [in Russian].
5. **Pavlov V. P., Vinogradov G. V.** Generalized rheological characteristics of plastic disperse systems / Kolloid. Zh. 1966. Vol. 28. N 3. P. 424 – 430 [in Russian].
6. **Nekuchaev V. O., Vaseneva A. A.** Peculiarities of the rheological curves of the flow of heavy oil and water emulsions / Neft. Khoz. 2013. N 8. P. 61 – 63 [in Russian].
7. **Nekuchaev V. O., Stanich S. I.** Investigation of temperature dependence of viscosity and activation energy of flow of high-wax and high-viscosity oil in Timan-Pechora province / Problems of development and exploitation of deposits of heavy oil and bitumen: materials of interregional scientific conference. — Ukhita: Izd. UGTU, 2015. P. 218 – 221 [in Russian].
8. **Fedorov P. V., Nekuchaev V. O., Pustin A. A.** About influence of heat treatment on the rheological properties of highly viscous oil, pumped at MN "USA-Ukhta" and "Ukhta-Yaroslavl" / Nauka Tekhnol. Truboprov. Transp. Nefti Nefteprod. 2016. N 6(26). P. 58 – 63 [in Russian].