



УДК 54.01

**АНАЛИЗ РЕОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ****ANALYSIS OF RHEOPHYSICAL PROPERTIES OF HIGH-VISCOSITY OIL****Аяпбергенов Ерболат Озарбаевич**

кандидат технических наук,  
руководитель службы анализа флюидов  
филиала ТОО «КМГ Инжиниринг» «КазНИПИМунайгаз»  
e.ayapbergenov@kmge.kz

**Серкебаева Базаргул Серкебаевна**

соискатель докторской степени в УГНТУ, РФ  
заведующий лабораторией  
физико-химических исследований нефти  
филиала ТОО «КМГ Инжиниринг» «КазНИПИМунайгаз»  
b.serkebayeva@kmge.kz

**Нурбаев Алтынбек Сергеевич**

инженер лаборатории  
исследования нефти и нефтепродуктов  
филиала ТОО «КМГ Инжиниринг» «КазНИПИМунайгаз»  
al.nurbayev@kmge.kz

**Аннотация.** Одной из актуальных задач является повышение эффективности разработки месторождений тяжелой высоковязкой нефти. Возникает необходимость более глубокого изучения свойств высоковязкой нефти с целью совершенствования технологий повышения нефтеотдачи пласта. В данной статье приведены результаты лабораторных исследований по определению плотности, вязкости, содержания асфальтосмолопарафинистых веществ с сопоставлением полученных результатов, а также результаты по изучению реологической характеристики тяжелой высоковязкой нефти с различной обводненностью на примере месторождения Западного Казахстана. Определены температурные пределы и влияние обводненности на проявления неньютоновских свойств.

**Ключевые слова:** реологические исследования, неньютоновская жидкость, динамическая вязкость, градиент сдвига, напряжение сдвига, высоковязкая нефть.

**Ayapbergenov Erbolat Ozarbaevich**

Candidate of Technical Sciences,  
Supervisor of Fluid Analysis Service,  
KazNIPImunaigas branch  
of KMG Engineering LLP  
e.ayapbergenov@kmge.kz

**Serkebaeva Bazargul Serkebaevna**

Applicant for a PHD degree  
in the USPTU, Russian Federation  
Head of the Laboratory of Physical  
and Chemical Research of Oil,  
KazNIPImunaigas branch  
of KMG Engineering LLP  
b.serkebayeva@kmge.kz

**Nurbayev Altynbek Sergeevich**

Laboratory Engineer  
oil and petroleum product research,  
KazNIPImunaigas branch  
of KMG Engineering LLP  
al.nurbayev@kmge.kz

**Annotation.** One of the urgent tasks is to increase the efficiency of development of heavy, highly viscous oil fields. There is a need for a more in-depth study of the properties of high-viscosity oil in order to improve enhanced oil recovery technologies. This article presents the results of laboratory studies to determine the density, viscosity, content of asphalt-resin-paraffin substances with a comparison of the results obtained, as well as the results of the study of the rheological characteristics of heavy high-viscosity oil with different water cut on the example of field in Western Kazakhstan. Temperature limits and water cutoffs of the manifestation of non-Newtonian properties were determined.

**Keywords:** rheological studies, non-Newtonian fluid, dynamic viscosity, shear gradient, shear stress, high-viscosity oil.

**В** Западном Казахстане расположено большое количество месторождений высоковязкой, тяжелой нефти плотностью более  $0,895 \text{ г/см}^3$ , которые, согласно классификации, относятся к группе битуминозных [1–4]. Такая нефть, как правило, содержится в горизонтах, залегающих на небольших глубинах (400–700 м) [5], где пластовые температуры составляют  $30\text{--}35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Характерной особенностью является низкое газосодержание  $8\text{--}12 \text{ м}^3/\text{т}$ , малое количество легкой фракции, значительное содержание смолисто-асфальтеновых веществ (САВ), обуславливающие высокую плотность. Вязкость тяжелой нефти носит аномальный характер [6–8]. При достижении критической концентрации САВ наступает резкое изменение реологических свойств и начинают в значительной мере проявляться структурно-механические свойства, что объясняется межмолекулярными взаимодействиями САВ с другими молекулами нефтяной дисперсной системы [3, 4, 9, 10].

Проведенные ранее лабораторные исследования тяжелой нефти одного из высоковязких месторождений Западного Казахстана позволили установить неньютоновские свойства в области температур ниже  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Также было отмечено существенное различие в значениях вязкости при температуре  $20\text{--}30 \text{ }^\circ\text{C}$  для разных скважин в пределах месторождения [3, 7, 8, 11]. Учитывая стадию разработки месторождения, важно понимать, как зависит реологическая характеристика нефти от обводненности.



Высокая вязкость создает определенные сложности при добыче, сборе и подготовке высоковязкой нефти и требует особых подходов при эксплуатации таких месторождений. Основными методами освоения вязкой нефти в мировой практике являются термические, газовые, химические и физические [11].

На месторождении применяется паротепловое воздействие и закачка горячей воды с температурой 90 °С и 120 °С. Для повышения нефтеотдачи активно проводятся опытно-промышленные испытания различных современных технологий, оценка эффективности которых осуществляется с применением гидродинамического моделирования. Повышение достоверности расчетов обеспечивается проведением расширенного комплекса лабораторных исследований по определению физико-химических свойств рабочего агента, пластовой и дегазированной нефти. Реологическое поведение нефти в пластовых и поверхностных условиях требует детального изучения в широком диапазоне температур.

Полученные результаты физико-химических свойств представлены в таблице 1.

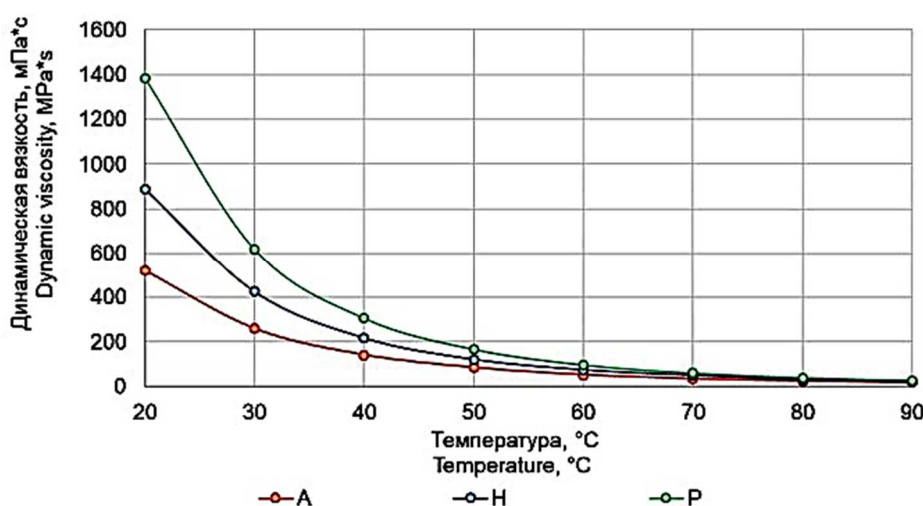
**Таблица 1** – Основные свойства высоковязкой нефти месторождения

Параметры	Диапазон значений	Метод испытания
Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	0,9323÷0,9450	ГОСТ 3900-85
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	557,7÷1458,3	ГОСТ 31391-2020
Температура застывания, °С	-16	ГОСТ 20287-91
Содержание, % масс.:		ГОСТ 11851-2018
– парафинов	2,7÷3,9	–
– смол	17,1÷18,9	–
– асфальтенов	3,2÷3,9	–
АСПВ в сумме в среднем	24,9	–

Как видно из представленных данных, нефть месторождения характеризуется высоким содержанием смол (~18 %) и асфальтенов (3÷4 %). Содержание парафинов относительно невысокое (2÷4 %), что обуславливает отрицательную температуру застывания.

В ходе изучения аномально-вязкостных свойств нефти для выявления температурного интервала, где проявляются неньютоновские свойства тяжелой нефти были проведены лабораторные исследования по определению характера изменения реологической кривой течения нефти с помощью измерений на автоматическом реометре MCR 702, который позволяет выполнять широкий диапазон статических и динамических тестов как в режиме контролируемого напряжения, так и в режиме контроля скорости сдвига. Скорость сдвига изменялась от 0,1 до 100 с<sup>-1</sup>.

По экспериментальным данным построены реологические кривые зависимостей вязкости от скорости сдвига, напряжения от скорости сдвига. На рисунке 1 представлена зависимость динамической вязкости нефти от температуры.



**Рисунок 1** – Зависимость динамической вязкости нефти от температуры

Как видно из результатов исследований, у высоковязкой смолистой нефти месторождений Западного Казахстана резкий рост вязкости наблюдается при снижении температуры от 60 °С до 20 °С. С повышением температуры выше 60 °С снижение вязкости становится незначительным.



Сопоставление кинематической вязкости нефти разных скважин с плотностью показывает, что при заданной температуре вязкость повышается с повышением плотности нефти (рис. 2).

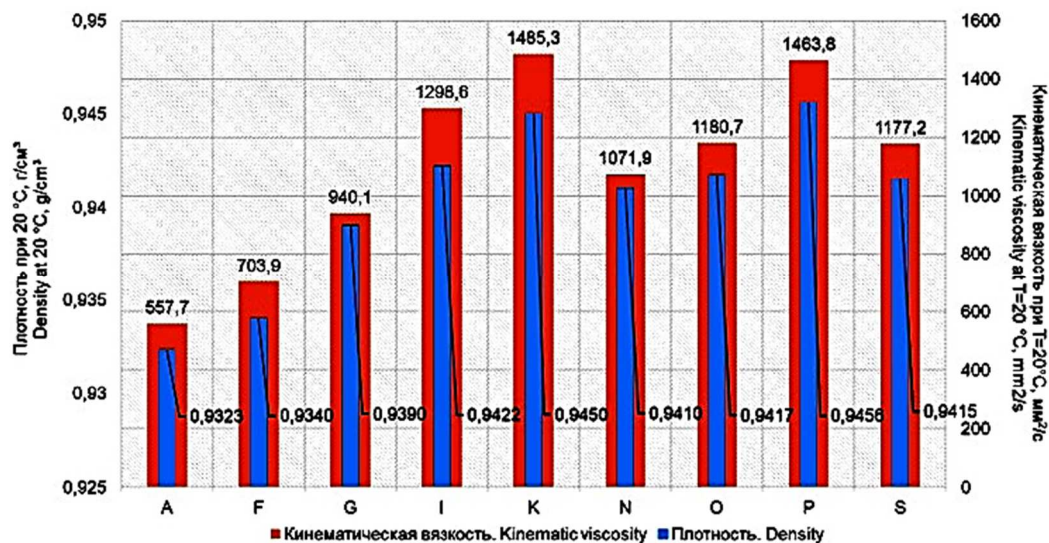


Рисунок 2 – Сопоставление кинематической вязкости нефти с плотностью

На рисунке 3 представлены результаты определения динамической вязкости при температуре 20 °С и содержания АСПВ в нефти разных скважин. Как видно из представленных графиков, четкой зависимости между значениями динамической вязкости и содержанием смол, асфальтенов и парафинов не выявлено.

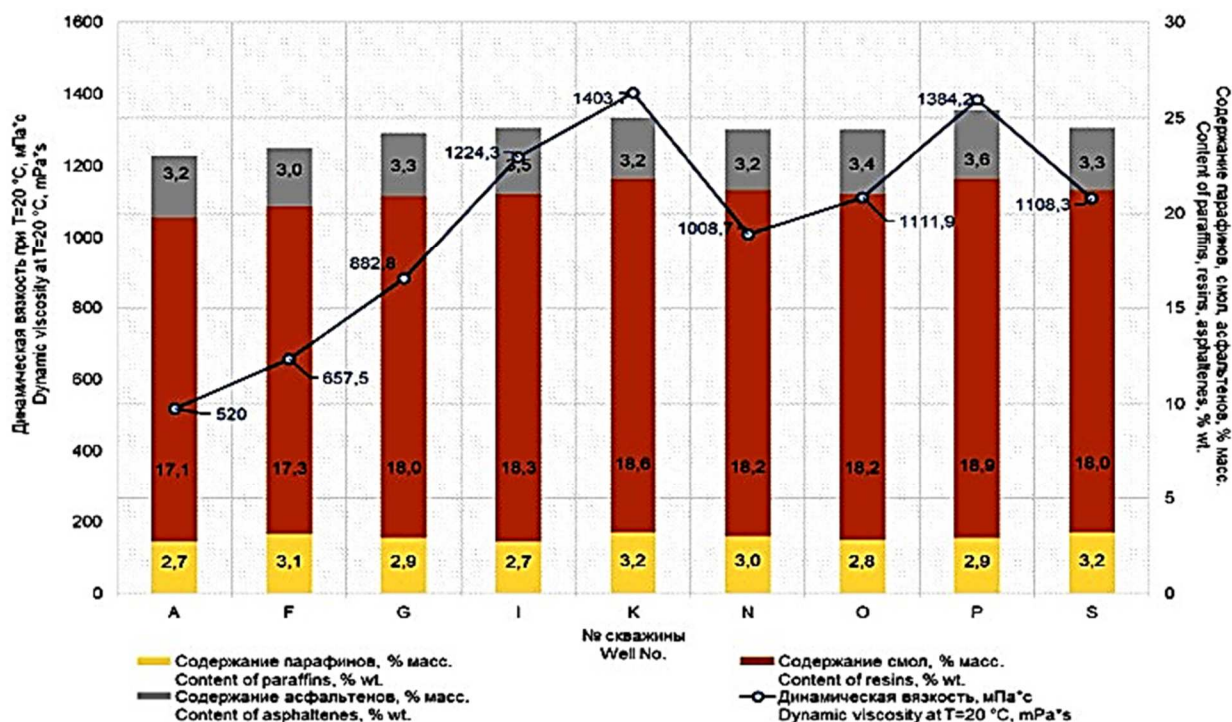


Рисунок 3 – Сопоставление кинематической вязкости нефти с содержанием АСПВ на примере нефти скважин

Проявление тяжелой нефтью аномалий вязкости приводит к различным осложнениям при разработке месторождения: возрастает неравномерность продвижения нефти на различных участках пласта, увеличивается количество попутно-добываемой воды в составе добываемого флюида, уменьшается охват пласта фильтрацией и вытеснением. Несмотря на отрицательные температуры застывания, для смолистой нефти также имеет место проблема транспорта.



Для построения реологических характеристик нефти проведены измерения напряжений сдвига в широком диапазоне скоростей сдвига от 0 до 100 с<sup>-1</sup> при различных температурах (0 °С, 30 °С и 50 °С). Экспериментальные исследования проводились как для безводной нефти, так и с содержанием воды. При приготовлении нефтяных эмульсий с различной обводненностью было установлено, что в нефти данного месторождения максимальное содержание связанной воды составляет 70 %.

Опытные значения измерений напряжений сдвига при разных скоростях сдвига представлены на рисунках 4–6. Анализируя полученные результаты по исследованию реологического поведения высоковязкой тяжелой нефти, необходимо отметить, что при высоком содержании связанной воды (более 50 %) в нефтяной эмульсии высоковязкого месторождения наблюдается свойства псевдопластичной жидкости (рис. 4–6) при пластовых значениях температуры 30 °С и ниже. При уменьшении содержания связанной воды и с увеличением температуры кривые течения нефти ближе к ньютоновским жидкостям.

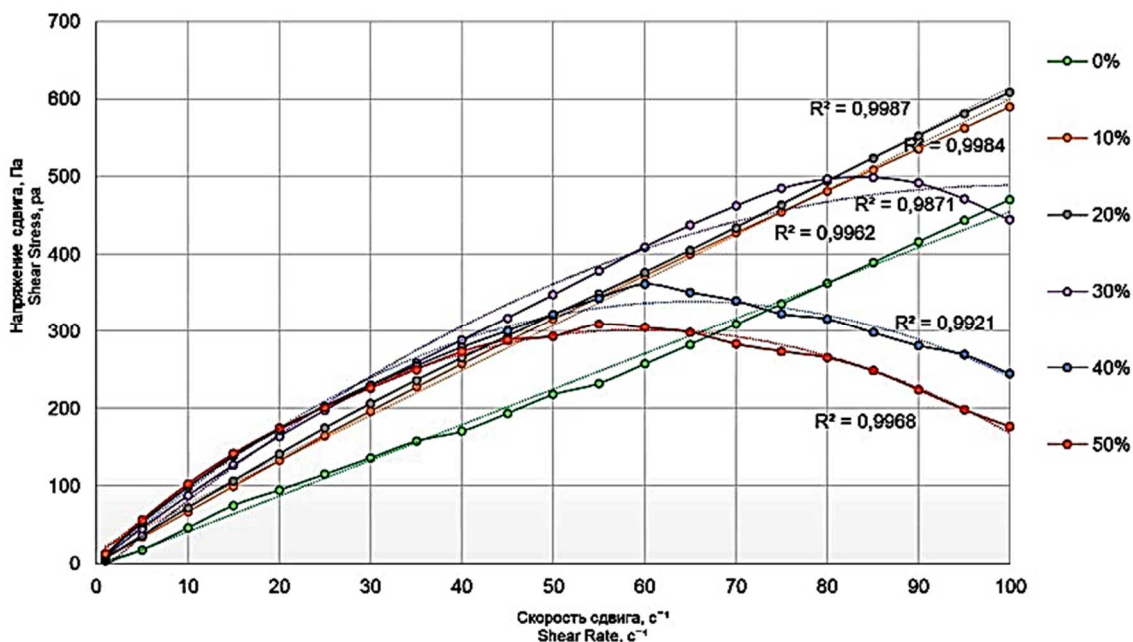


Рисунок 4 – Зависимость напряжения от скорости сдвига при T = 0 °C

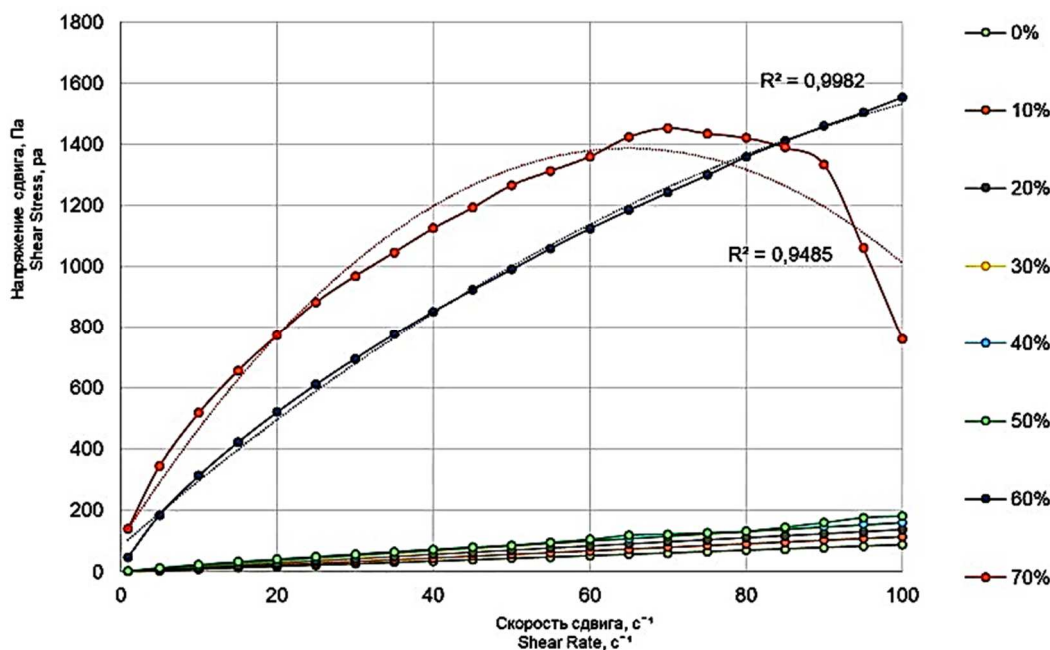


Рисунок 5 – Зависимость напряжения от скорости сдвига при T = 30 °C

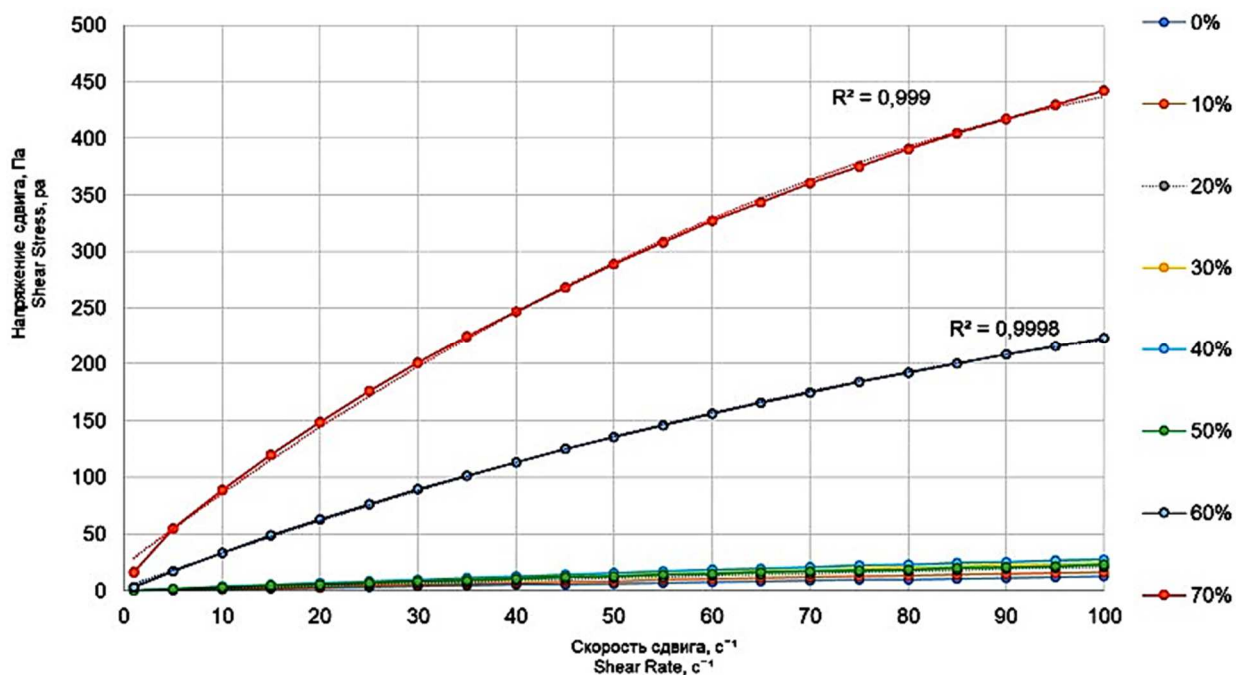


Рисунок 6 – Зависимость напряжения от скорости сдвига при T = 50 °C

Выраженность неньютоновских свойств нефти западного Казахстана обусловлена повышенным содержанием высокомолекулярных компонентов: асфальтенов, смол и парафинов. Вязкость такой нефти является величиной непостоянной и зависит от действующих напряжений сдвига. При малых напряжениях сдвига эффективная вязкость нефти наибольшая и постоянная, соответствующая вязкости нефти с неразрушенной структурой. С ростом напряжения сдвига эффективная вязкость нефти уменьшается и становится равной вязкости нефти с полностью разрушенной структурой [1, 2, 10].

Несмотря на различия по вязкости разной степени обводненных проб высоковязкой нефти, тенденция изменения вязкости нефти в зависимости от градиента сдвига одинакова. Образование структурированных систем из частиц смол и асфальтенов наблюдается при течении со сравнительными низкими градиентами сдвига. При разработке месторождений высоковязкой нефти необходимо учитывать зависимость вязкости нефти от градиента сдвига в интервале низких значений – 0 до 60 с<sup>-1</sup>. При понижении температуры до 0 °C наблюдается увеличение вязкости у безводной нефти почти в 70 раз, а у водонефтяных эмульсий от 100 до 180 раз; с увеличением температуры структура пластичной жидкости разрушается, и она ведет себя как ньютоновская.

Полученные результаты имеют практический интерес. При создании композиционной модели для использования в гидродинамической модели и технологическом моделировании системы сбора и транспорта должны учитываться реологические характеристики нефти конкретного месторождения.

### Список литературы:

1. Шайдаков В.В. Физико-химическое воздействие на добываемую продукция нефтяных скважин // Нефтегазовое дело. – 2004. – № 1. – С. 10–13.
2. Надиров Н.К. Высоковязкие нефти и природные битумы (История. Бассейны. Свойства). – Актау : Ғылым, 2001. – Т. 1. – 256 с.
3. Серкебаева С.Б. Исследование реологических параметров мангышлакской нефти для трубопроводной транспортировки // Сб. статей международной научной конференции «Неньютоновские системы в нефтегазовой отрасли». – Баку, 2013. – С. 229.
4. Мусабаев Т.Т. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы Республики Казахстан / Т.Т. Мусабаев, Б.А. Смагулов // Горный журнал Казахстана. – 2014. – № 1. – С. 11–15.
5. Липаев А.А. Разработка месторождений тяжёлых нефтей и природных битумов. – М.; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2013. – 484 с.
6. Мамахатов Т.М. Прогноз развития нетрадиционных источников углеводородов в мировой энергетике // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2012. – № 3. – С. 149–154.
7. Есполов И.Т. Особенности реологических свойств высоковязкой нефти при транспортировке по трубопроводу / И.Т. Есполов, Е.О. Аяпбергенов, С.Б. Серкебаева // Научно-информационный сборник «Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья». – 2016. – № 3. – С. 35–40.



8. Особенности реологических свойств высоковязких нефтей / О.Б. Саенко [и др.] // Сборник трудов АО «НИПИнефтегаз» «Проблемы нефтегазовой отрасли Республики Казахстан и научный подход к их решению». – Актау, 2015. – Вып. 2. – С. 153–159.

9. Mullins O.C. The asphaltenes // Annual Review of Analytical Chemistry. – 2011. – Vol. 4. – P. 393–418.

10. Шуханова Ж.К. Месторождения битуминозных пород в Казахстане / Ж.К. Шуханова, Е.С. Орынгожин // Вестник КазНТУ. – 2014. – № 1. – С. 7–9.

11. Саенко О.Б. Изучение свойств нефтей Мангистауского региона и выбор вариантов транспортировки / О.Б. Саенко, А.А. Рылеев, С.В. Лозовая // Сборник трудов АО «НИПИнефтегаз» «Актуальные вопросы нефтегазовой отрасли». – Актау, 2016. – Вып. 3. – С. 117–126.

#### List of references:

1. Shaidakov V.V. Physico-chemical impact on produced oil wells // Neftegazovoye delo. – 2004. – № 1. – P. 10–13.

2. Nadirov N.K. High-viscosity oils and natural bitumens (History. Basins. Properties). – Aktau : Фылым, 2001. – Vol. 1. – 256 p.

3. Serkebayeva S.B. Study of rheological parameters of Mangyshlak oil for pipeline transportation // Collection of articles of the international scientific conference «Non-Newtonian systems in the oil and gas industry». – Baku, 2013. – P. 229.

4. Musabaev T.T. State and prospects of development of mineral resource base of the Republic of Kazakhstan / T.T. Musabaev, B.A. Smagulov // Mining Journal of Kazakhstan. – 2014. – № 1. – P. 11–15.

5. Lipaev A.A. Development of heavy oil and natural bitumen fields. - Moscow; Izhevsk : Institute of Computer Research, 2013. 484 p.

6. Mamakhatov T.M. Forecast of development of unconventional hydrocarbon sources in the world energy // Interexpo Geo-Siberia. – 2012. – № 3. – P. 149–154.

7. Espolov I.T. Features of rheological properties of high-viscosity oil during pipeline transportation / I.T. Espolov, E.O. Ayapbergenov, S.B. Serkebaeva // Scientific and Information Collection «Transportation and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials». – 2016. – № 3. – P. 35–40.

8. Features of rheological properties of high-viscosity oils / O.B. Saenko [et al. Saenko [et al] // Collection of works of JSC «NIPIneftegaz» «Problems of oil and gas industry of the Republic of Kazakhstan and scientific approach to their solution». – Aktau, 2015. – Iss. 2. – P. 153–159.

9. Mullins O.C. The asphaltenes // Annual Review of Analytical Chemistry. – 2011. – Vol. 4. – P. 393–418.

10. Shukhanova J.K. Deposits of bituminous rocks in Kazakhstan / J.K. Shukhanova, E.S. Oryngozhin // Bulletin of KazNTU. - 2014. - № 1. – P. 7–9.

11. Saenko O.B. Study of oil properties of the Mangistau region and the choice of transportation options / O.B. Saenko, A.A. Ryleev, S.V. Lozovaya // Proceedings of JSC «NIPIneftegaz» «Actual issues of oil and gas industry». – Aktau, 2016. – Issue 3. – P. 117–126.