

А.И. Закиров, А.К. Николаев, В.В. Пшенин

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СМЕСИ БИТУМИНОЗНОЙ И МАЛОВЯЗКОЙ НЕФТЕЙ АШАЛЬЧИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Исследованы реологические модели смесей битуминозной и маловязкой нефтей Ашальчинского месторождения в широком диапазоне температур и концентрации разбавителя. Особое внимание уделено области параметров, в которых нефтяная смесь проявляет неньютоновские свойства. В результате статистической обработки результатов экспериментальных исследований был предложен ряд реологических моделей. Теоретический анализ полученных моделей показал, что с уменьшением концентрации разбавителя и температуры смеси реологические модели усложняются и приобретают сильно выраженную нелинейность. Для описания указанных изменений в работе предложено пользоваться реологическими моделями в следующей последовательности: модель Ньютона – модель Оствальда-де Ваале – модель Эллиса – модель Карро. Предложенные модели с высокой степенью точности и качественно верно описывают реологические свойства нефтяной смеси.

Ключевые слова: битуминозная нефть, нефтяные смеси, неньютоновские жидкости, реологические модели.

Актуальность

Республика Татарстан является одним из старейших нефтедобывающих районов страны. Углеводородные ресурсы недр Республики Татарстан не ограничиваются только традиционной нефтью. Также республика располагает значительными (от 2 до 7 млрд т) запасами природных битумов и высоковязких нефтей. Основным нефтедобывающим предприятием является ОАО «Татнефть».

Нефтегазодобывающая компания ОАО «Татнефть» ведет опытно-промышленную разработку Ашальчинского месторождения высоковязких нефтей с использованием метода парогравитационного дренажа. На Мордово-Кармальском месторождении высоковязких нефтей опытно-промышленная разработка ведется методом внутриводяного горения. Активно внедряются новые технологии добычи природных битумов, в виде парных и одиночных пароциклических гори-

зонтальных скважин [1]. Стимулом к эффективному развитию данного проекта являются льготы в виде снижения экспортной пошлины для месторождений сверхвязкой нефти.

Увеличение доли высоковязких нефтей и природных битумов в объеме нефтедобычи Республики Татарстан, а также удаленность разрабатываемых месторождений от мест переработки повышают актуальность проблем, связанных с транспортированием таких нефтей. Одной из доказавших свою эффективность технологий трубопроводного транспорта, является технология перекачки с предварительным подогревом и разбавлением маловязкой нефтью. При использовании данной технологии особую важность имеет определение реологических свойств нефтяной смеси для различных температур и концентраций маловязкого разбавителя. В этой связи задача исследования реологических моделей смеси битуминозной и маловязкой неф-

тей Ашальчинского месторождения является актуальной.

Экспериментальные исследования и их результаты

В ходе работы проведены исследования образцов битуминозной и маловязкой нефти Ашальчинского месторождения.

Экспериментальные исследования проводились в Центре инженерных изысканий (Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»), на ротационном реометре «Kinexus ultra+». В результате анализа экспериментальных данных согласно методикам изложенным в работах [2, 4, 5], было установлено, что нефтяная смесь проявляет неньютоновские свойства при температуре ниже 30 °С. Таким образом, в соответствии с поставленной в работе задачей исследования приняты следующие диапазоны параметров: температура образцов смеси в ходе испытаний изменялась в пределах от 5 до 30 °С; характеристики течения нефтяной смеси (НС) исследованы в условиях дискретного повышения скорости сдвига от 0 до 300 с⁻¹.

Экспериментальные данные подверглись статистической обработке в программном комплексе Statistica 10. При обработке экспериментальных данных был использован способ нелинейного оценивания (nonlinear estimation), основанный на методе наименьших квадратов. Экспериментальные данные обрабатывались относительно моделей течения неньютоновских жидкостей приведенных в табл. 1.

Выбор реологической модели производился по алгоритму приведенному в работах [2, 3, 4]. Определение параметров выбранной модели производилось по методу Хука-Дживиса. При каждой итерации метод сначала определяет схему расположения параметров, оптимизируя текущую функцию потерь перемещением каждого параметра по отдельности. При этом вся комбинация параметров сдвигается на новое место. Это новое положение в *m*-мерном пространстве параметров определяется экстраполяцией вдоль линии, соединяющей текущую базовую точку с новой точкой. Размер шага этого процесса постоянно меняется для попадания в оптимальную точку. Этот метод обычно очень эффек-

Таблица 1

Некоторые реологические модели течения неньютоновских жидкостей

Название модели	Уравнение	Параметры моделей
Оствальда-де Вааля (Ostwald de Waele model or power-law)	$\tau = K\dot{\gamma}^n$	τ – касательное напряжение сдвига;
Эллиса (Ellis fluid model)	$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \left(\frac{\tau}{\tau_{1/2}}\right)^{\alpha-1}}$	$\dot{\gamma}$ – скорость сдвига; K – показатель консистенции; n – индекс течения; μ – ньютоновская вязкость; μ_0, μ_{inf} – коэффициент динамической вязкости соответственно для $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ и для $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$;
Карро (Carreau model)	$\mu = \mu_{inf} + \frac{(\mu_0 - \mu_{inf})}{1 + (b \cdot \dot{\gamma})^2}^{\frac{c-1}{2}}$	$\tau_{1/2}$ – напряжение сдвига при $\mu = \mu_0/2$; α – определяющий параметр, связанный с индексом течения $\alpha = 1/n$; b – время релаксации; c – показатель степени.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований реологических свойств смеси битуминозной и маловязкой нефти Ашальчинского месторождения

$\theta_{\text{разб.}}, \%$	$T_{\text{НС}}, ^\circ\text{C}$	Границы скорости сдвига, 1/с	Реологическая модель	Параметры модели	Рисунок (табл. 3)
75	10	1–300	Оствальда-де Вааля (Ostwald de Waele model or power-law)	$K = 0,638$ $n = 0,995$	1
75	5	1–300	Оствальда-де Вааля (Ostwald de Waele model or power-law)	$K = 1,006$ $n = 0,991$	2
50	20	1–300	Оствальда-де Вааля (Ostwald de Waele model or power-law)	$K = 0,436$ $n = 0,990$	3
50	10	1–300	Оствальда-де Вааля (Ostwald de Waele model or power-law)	$K = 1,0154$ $n = 0,991$	4
50	5	10–300	Эллиса (Ellis fluid model)	$\mu_0 = 1,573$ $\tau_{1/2} = 3984,220$ $\alpha = 2,435$	5
25	20	10–300	Эллиса (Ellis fluid model)	$\mu_0 = 1,242$ $\tau_{1/2} = 1503,811$ $\alpha = 3,851$	6
25	10	10–300	Эллиса (Ellis fluid model)	$\mu_0 = 3,397$ $\tau_{1/2} = 2131,171$ $\alpha = 3,711$	7
25	5	10–300	Эллиса (Ellis fluid model)	$\mu_0 = 5,911$ $\tau_{1/2} = 2706,125$ $\alpha = 3,464$	8
0	30	10–300	Эллиса (Ellis fluid model)	$\mu_0 = 1,070$ $\tau_{1/2} = 1411,198$ $\alpha = 3,991$	9
0	20	10–300	Эллиса (Ellis fluid model)	$\mu_0 = 2,752$ $\tau_{1/2} = 1930,464$ $\alpha = 3,890$	10
0	10	10–300	Эллиса (Ellis fluid model)	$\mu_0 = 8,632$ $\tau_{1/2} = 2665,803$ $\alpha = 5,027$	11
0	5	10–300	Карро (Carreau model)	$\mu_{\text{inf}} = 3,309$ $\mu_0 = 17,228$ $b = 0,01$ $c = 0,405$	12

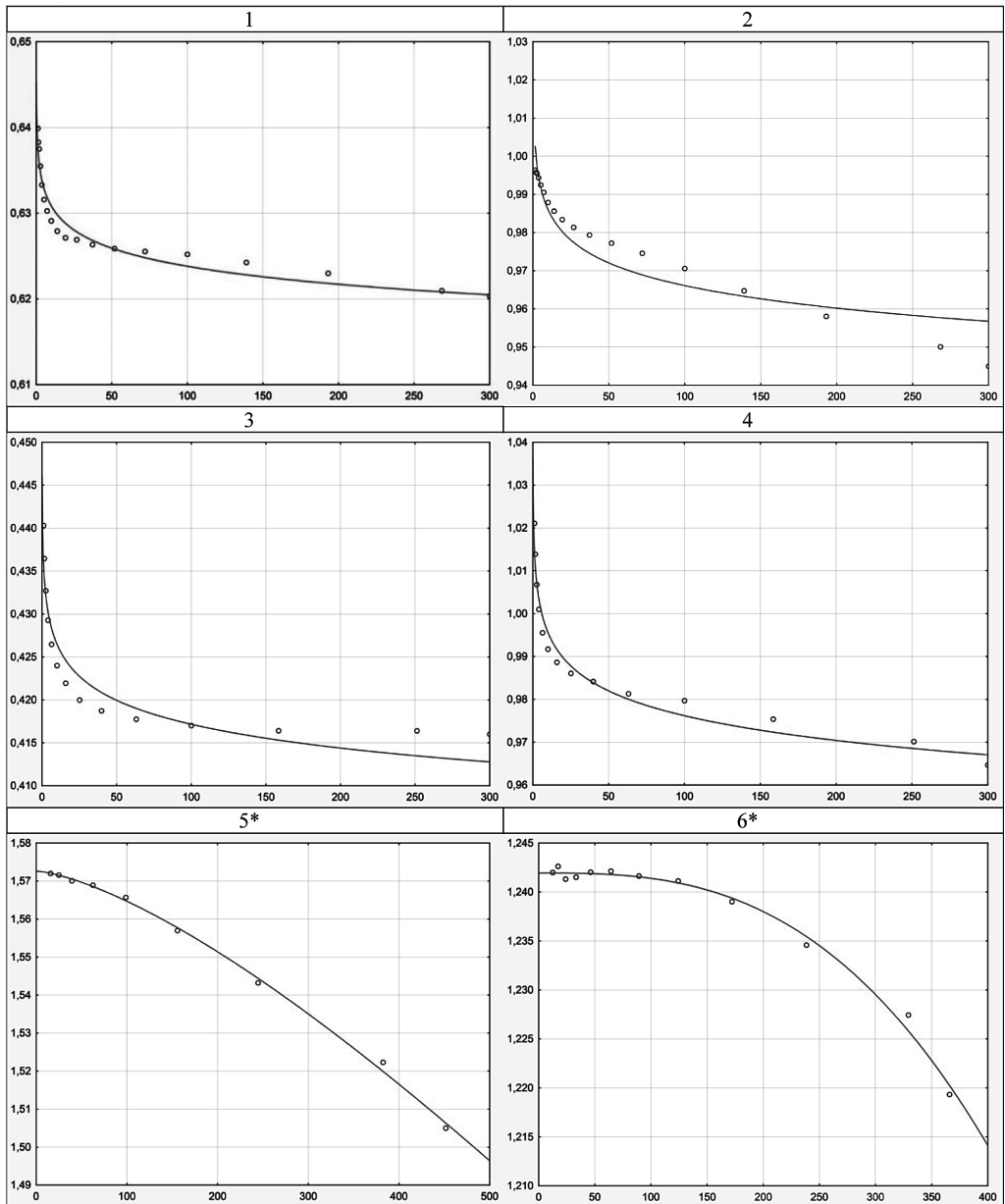
тивен и его следует использовать, если квази-ньютоновский и симплекс-метод не дали удовлетворительных оценок.

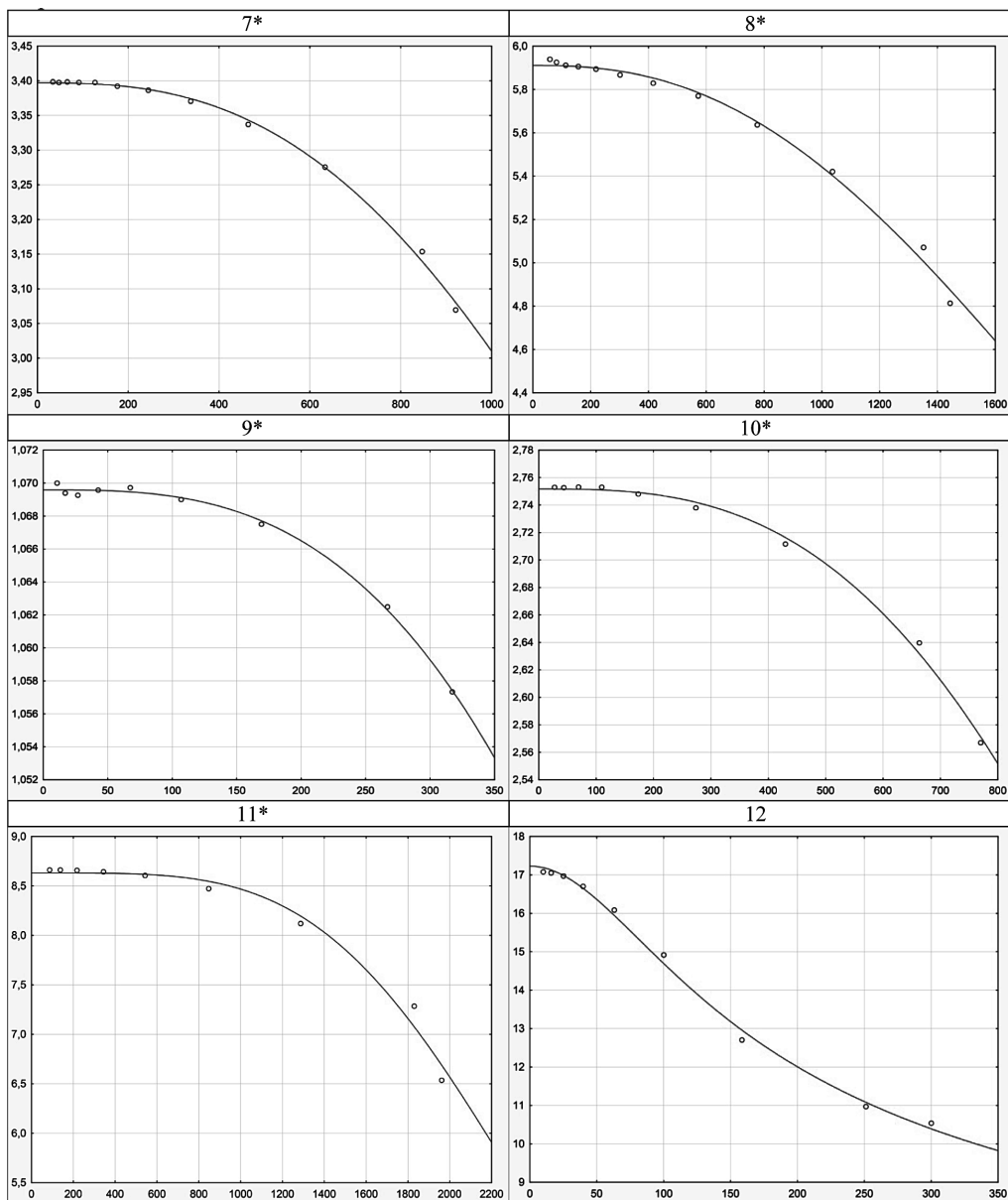
Полученные результаты собраны и представлены в табл. 2.

Графическая интерпретация экспериментальных данных и зависимостей, полученных в результате их статистической обработки (табл. 2), представлена в табл. 3.

Таблица 3

Графическое представление зависимости коэффициента динамической вязкости от градиента скорости сдвига
 (- зависимость коэф. динамической вязкости от напряжения сдвига)



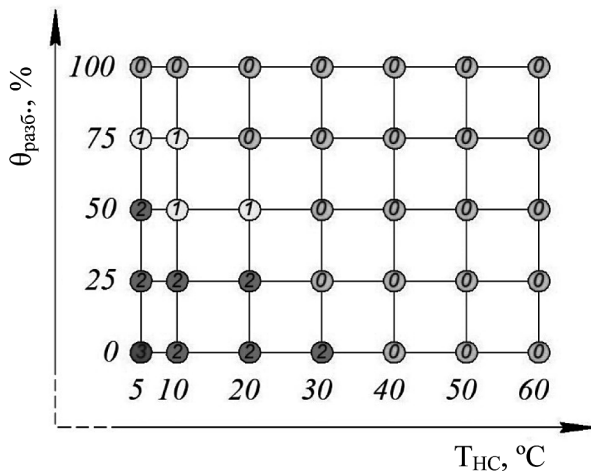


Выводы

В работе исследованы реологические модели смесей битуминозной и маловязкой нефтей Ашальчинского месторождения в диапазоне температур от 5 до 60 °С и концентрации разбавителя от 0 до 100 %. Особое вни-

мание уделено области параметров, в которых нефтяная смесь проявляет неньютоновские свойства (температура смеси 30 °С и ниже).

На основе анализа экспериментальных данных было установлено, что реологические модели нефтяных смесей



«Карта» реологических моделей смеси битуминозной и маловязкой нефтей Ашальчинского месторождения при различных значениях температуры и концентрации маловязкой нефти: 0 – модель Ньютона; 1 – модель Оствальда-деВаалея (Ostwald de Waele model or power-law); 2 – модель Эллиса (Ellisfluid model); 3 – модель Карро (Carreau model)

с уменьшением температуры и концентрации разбавителя сменяются в следующей последовательности: модель Ньютона – модель Оствальда-де Ваале – модель Эллиса – модель Карро. Таким образом, установлена иерархия реологических моделей для исследуемой нефтяной системы: от простейшей однопараметрической модели Ньютона до модели Карро, включающей в себя 4 независимых параметра. Предложенные модели с высокой степенью точ-

ности и качественно верно описывают реологические свойства нефтяной смеси. На рисунке представлена «карта» реологических моделей исследуемых нефтяных смесей.

В дальнейших работах предполагается применить полученные результаты исследований реологических моделей к практическим вопросам трубопроводного транспорта смеси битуминозной и маловязкой нефтей Ашальчинского месторождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хисамов Р.С., Мусин М.М., Мусин К.М., Файзуллин И.Н., Зарипов А.Т. Обобщение результатов лабораторных и опытно-промышленных работ по извлечению сверхвязкой нефти из пласта. – Казань: «Фэн» Академии наук РТ, 2013. – 213 с.

2. Штукатуров К.Ю. Экономико-математическое моделирование выбора технологических режимов трубопровода: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18. – Уфа, 2004. – 154 с.

3. Мирзаянзаде А.Х., Хасанов М.М., Бахтизин Р.Н. Эгоды о моделировании сложных систем нефтедобычи. Нелиней-

ность, неравновесность, неоднородность. – Уфа: Гилем, 1999. – 464 с.

4. РД 75.180.00-КТН-198-09 Унифицированные технологические расчеты объектов магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов. – М.: Гипротрубопровод, 2009. – 207 с.

5. Закиров А.И., Каримов А.И., Пшенин В.В. Исследование реологических свойств битуминозной нефти Ашальчинского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 10. – С. 382–389. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Закиров Айдар Ильдусович¹ – аспирант, e-mail: zakirov-live@mail.ru,
Николаев Александр Константинович¹ – доктор технических наук, профессор,
e-mail: alekNIKOL@mail.ru,

Пшенин Владимир Викторович – кандидат технических наук,
ведущий инженер, e-mail: vladimirspmi@mail.ru,
ЗАО «КТПИ «Газпроект»,

¹ Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».

UDC 622.692.4.053

INVESTIGATION OF THE RHEOLOGICAL MODEL MIXTURES OF THE BITUMINOUS AND LOW-VISCOSITY OILS OF ASHALCHINSKOYE OILFIELD

Zakirov A.I.¹, Graduate Student, e-mail: zakirov-live@mail.ru,

Nikolaev A.K.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,

e-mail: alekNIKOL@mail.ru,

Pshenin V.V., Candidate of Technical Sciences, Leading Engineer,

e-mail: vladimirspmi@mail.ru, Gazproject Company,

195274, Saint-Petersburg, Russia,

¹ National Mineral Resource University «University of Mines»,

199106, Saint-Petersburg, Russia.

In the paper the rheological model mixtures of the bituminous and low-viscosity oils of Ashalchinskoye oilfield were investigated in a wide range of temperatures and concentration of diluent. Particular attention is given to the range of parameters in which the oil mixture exhibits non-Newtonian properties. As a result of statistical processing of the experimental results has been proposed a number of rheological models. The theoretical analysis of the model showed that a decrease in the concentration and temperature of the mixture of diluent rheological models become more complex and strong expression nonlinearity. For a description of these changes in the proposed use of the rheological models in the following order: Newton's model – Ostwald de Waele model or power-law – Ellis fluid model – Carreau model. The proposed models describe rheological properties of the oil mixture with a high degree of accuracy and qualitatively correctly.

Key words: bitumen oil, oil mixtures, non-newtonian fluids, rheology models.

REFERENCES

1. Khisamov R.S., Musin M.M., Musin K.M., Fayzullin I.N., Zaripov A.T. *Obobshchenie rezul'tatov laboratornykh i opytно-promyshlennykh rabot po izvleshcheniyu sverkhvlyazkoy nefti iz plasta* (Generalization of laboratory and pilot testing results on super viscous oil recovery from reservoir), Kazan, «Fen» Akademii nauk RT, 2013, 213 p.

2. Shtukaturov K.Yu. *Ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie vybora tekhnologicheskikh rezhimov truboprovoda* (Economic-mathematical modeling of selecting operating schedule for pipeline), Candidate's thesis, Ufa, 2004, 154 p.

3. Mirzadzhanzade A.Kh., Khasanov M.M., Bakhtizin R.N. *Etyudy o modelirovanii slozhnykh sistem nefte-dobychi. Nelineynost', neravnovesnost', neodnorodnost'* (Essays on modeling complex systems of oil recovery. Nonlinearity, nonequilibrium, nonuniformity), Ufa, Gilem, 1999, 464 p.

4. Unifitsirovannyye tekhnologicheskie raschety ob"ektov magistral'nykh nefteprovodov i nefteproduktov-provodov. RD 75.180.00-KTN-198-09 (Unified process designs for objects of main oil and oil product lines. RD 75.180.00-KTN-198-09), Moscow, Giprotuboprovod, 2009, 207 p.

5. Zakirov A.I., Karimov A.I., Pshenin V.V. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 10, pp. 382–389.

