

Определение скорости течения пластичных смазок по цилиндрическим смазочным каналам

И.Д. Ибатуллин (докт. техн. наук, профессор), С.А. Белокоровкин (аспирант), Д.Р. Загидуллина (аспирант)

(Самарский государственный технический университет),

А.В. Боднарчук (бакалавр)

(Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина)

В целях обеспечения требуемого коэффициента обновления смазки в парах трения с принудительной подачей смазочного материала требуется оценка разных его параметров, позволяющих рассчитать скорость течения по каналам смазочной системы с учетом действующих давлений и температур. В статье представлена разработанная методика по определению скорости течения пластичных смазок по каналам цилиндрической формы.

Описаны термокинетическая методика оценки активационных характеристик течения пластичных смазок по цилиндрическим смазочным каналам и устройство для проведения термокинетических испытаний смазок, разработанное в лаборатории наноструктурированных покрытий Самарского государственного технического университета. Устройство позволяет проводить оценку активационных характеристик пластичных смазок при разных значениях давления и температуры. Результаты экспериментальных исследований скорости течения смазки по цилиндрическому каналу представлены в виде эпюр. Численные значения сведены в таблицу, по ним построены кинетические зависимости. Приведены значения активационных характеристик перспективных смазок для долот. Используя полученные значения активационных характеристик, можно провести расчет скорости течения смазки при разных давлениях и температурах.

Способность консистентной смазки проходить под давлением по каналам смазочной системы является одним из важнейших показателей ее качества. Данное свойство определяет не только возможность заправки смазки в механизмы, но и ее распределение по поверхности трения (в технических системах с централизованной подачей смазочного материала), что позволяет существенно снизить потери мощности на трение в процессе работы механизмов.

Данной проблемой занимается один из разделов физической механики – реология (возникшая около 90 лет назад). Большой вклад в изучение реологических свойств смазок внесли П.А. Ребиндер, Г.В. Виноградов, М.М. Гвоздев, В.П. Павлов, Г.М. Бартнев, Д.С. Великовский и др. Основными реологическими характеристиками пластичных смазок [1] являются:

- вязкость – мера внутреннего трения [2, 3];
- консистенция – мера густоты смазки;
- предел прочности – мера устойчивости смазки к механическим напряжениям;
- температура каплепадения – мера температурной стойкости загустителя;
- прокачиваемость смазки (pumpability) – способность проходить по каналам централизованной смазочной системы [10].

Однако реологические модели течения пластичных смазок до сих пор находятся на стадии развития и не могут предложить готовых для практического использования в инженерной практике решений для расчета скорости течения смазки по каналам смазочной системы опоры бурового долота. Особенно если учесть, что консистентные смазки – неньютоновские жидкости, для которых проявляется сильная зависи-

мость вязкости от температуры (определяемая вязкостно-температурной характеристикой – индексом вязкости), скорости течения (с увеличением скорости деформации вязкость снижается на порядки), предварительного механического воздействия, действующего гидростатического давления и т. д. Поэтому применительно к смазкам говорят только об эффективной (кажущейся, условной) вязкости, соответствующей вязкости ньютоновской жидкости, режим течения которой в данных условиях деформации одинаков с испытываемой смазкой. Это своего рода попытка "подогнать" сложную по внутренней структуре консистентную смазку (бингамовскую жидкость) в рамки реологических моделей, описывающих поведение более простых ньютоновских жидкостей [8]. Поэтому стандартные характеристики эффективной вязкости, полученные при температуре, скорости деформации и давлении, отличающиеся от создаваемых при эксплуатации долота на забое, абсолютно непригодны для реологических расчетов [5]. Другим аналогом вязкости применительно к пластичной смазке является пластическая вязкость, определяющая связь между скоростью сдвига и разностью действующего тангенциального напряжения и предела текучести [7]. Известна еще вязкость прокачивания (pumping viscosity), которая характеризует способность смазки течь через каналы смазочной системы [9]. Однако указанные параметры, в принципе, обладают теми же недостатками, что и эффективная вязкость.

Несмотря на то, что значительная доля экспериментальных данных по реологическим свойствам смазок, накопленных к настоящему времени, выражена в числах пенетрации и температуре каплепадения, дан-

ные параметры оказались еще менее ценными для физического объяснения и научного обоснования реологического поведения смазок в различных условиях, чем вязкость [6]. Пенетрация в настоящее время используется только как характеристика, косвенно характеризующая повторяемость свойств смазки от партии к партии. Каплепадение играет важную роль при выборе смазок для открытых систем, но в герметизированной системе смазки долом данный параметр не критичен, поскольку масло, вытекающая из мыльного каркаса, за счет гравитационных сил "стекает" в зону трения. Опыт показал, что смазки с одинаковыми значениями пенетрации и каплепадения могут иметь существенные отличия в эксплуатационных свойствах, в том числе по вязкости и пределу текучести, как известно из работ Д.С. Великовского.

Наиболее интересным с научной и практической точек зрения является молекулярно-кинетический подход к процессу течения пластичной смазки, в основе которого лежит учение Аррениуса и развитое Я.И. Френкелем [4] и Г.М. Бартеневым. Согласно данной теории, течение смазки представляет собой череду термофлуктуационных разрывов и восстановлений структурных межмолекулярных связей. Длительность "оседлой" жизни каждой связи τ_p определяется температурно-инвариантными характеристиками – энергией активации пластического течения смазки U_0 , которая по величине равна энергии разрушения каркасообразующих связей в смазочном материале, и структурно-чувствительным коэффициентом γ , определяющим влияние механических напряжений σ на изменение эффективной энергии активации пластического течения смазки $U(\sigma)$. С научной точки зрения молекулярно-кинетическая теория дает исчерпывающее физическое объяснение нелинейному поведению смазки в поле температурных и механических напряжений. Практически важным является то, что знание данных активационных характеристик течения смазки позволяет предсказывать ее реологическое поведение в широком диапазоне изменений нагрузок и температур, не обращаясь к другим эмпирическим реологическим параметрам. В основу данных исследований может быть положена кинетическая модель скорости деформации $\dot{\epsilon}$ твердых тел:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp\left(-\frac{U(\sigma)}{RT}\right), \quad U(\sigma) = U_0 - \gamma\sigma, \quad (1)$$

где $\dot{\epsilon}_0$ – постоянная скорости деформации; $U(\sigma)$ – эффективная энергия активации течения материала, кДж/моль; U_0 – энергия активации разрушения межмолекулярных связей; R – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К); T – абсолютная температура, К.

Примечательно то, что вышеприведенные модели в равной степени описывают поведение твердых тел (при ползучести), вязких жидкостей и пластичных материалов с разницей лишь в конкретных величинах активационных характеристик. К недостаткам можно отнести только то, что кинетический подход, хотя и возник около века назад, до сих пор не имеет ГОСТов на методики и приборы для возможности широкого применения в заводских лабораториях при оценке реологических свойств смазок для долот. Поэтому проблема создания таких методов и устройств является весьма актуальной, поскольку позволяет осуществить научно обоснованный подход к анализу течения смазки в смазочных каналах проектируемых долот.

Суть термокинетических испытаний по оценке активационных характеристик кинетических процессов (к которым, безусловно, можно отнести вязкое течение пластичной смазки по цилиндрическому каналу) заключается в том, что определяют скорость течения $\dot{\epsilon}$ при разных значениях (не менее трех) давления σ и температуры T . На основе полученных данных строят линейные зависимости $\lg \dot{\epsilon}$ от σ и экстраполируют их до пересечения прямых в одной точке (рис. 1). Показание оси ординат в данной точке соответствует величине $\lg \dot{\epsilon}_0$.

Перестраивают полученные экспериментальные результаты в координатах $U(\sigma)$ – эффективная энергия активации (ось ординат) – σ . Значение $U(\sigma)$ (кДж/моль) определяется из выражения

$$U(\sigma) = -RT \lg\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right). \quad (2)$$

Экстраполируют линейные зависимости $U(\sigma)$ – σ на ось ординат, где они пересекаются в одной точке. Положение данной точки на оси ординат соответствует значению энергии активации разрушения межмолекулярных связей U_0 . Рассчитывают структурно-чувствительный коэффициент по формуле

$$\gamma = \frac{U_0 - U(\sigma)}{\sigma}. \quad (3)$$

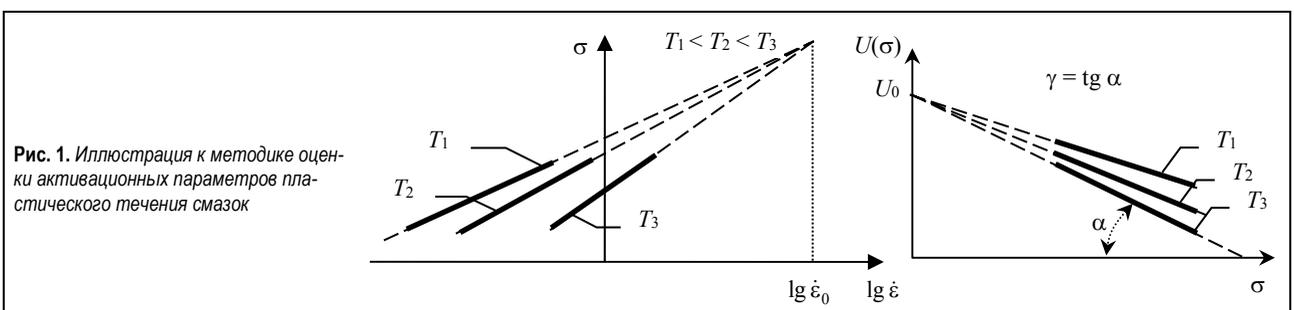


Рис. 1. Иллюстрация к методике оценки активационных параметров пластического течения смазок

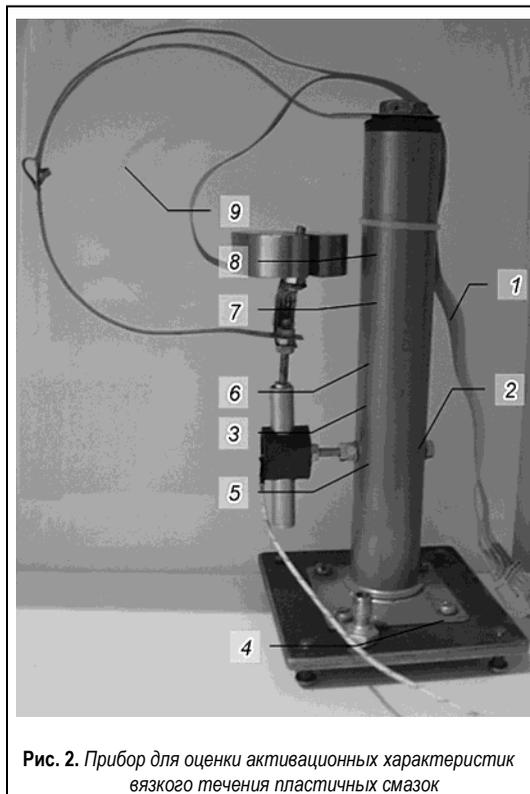
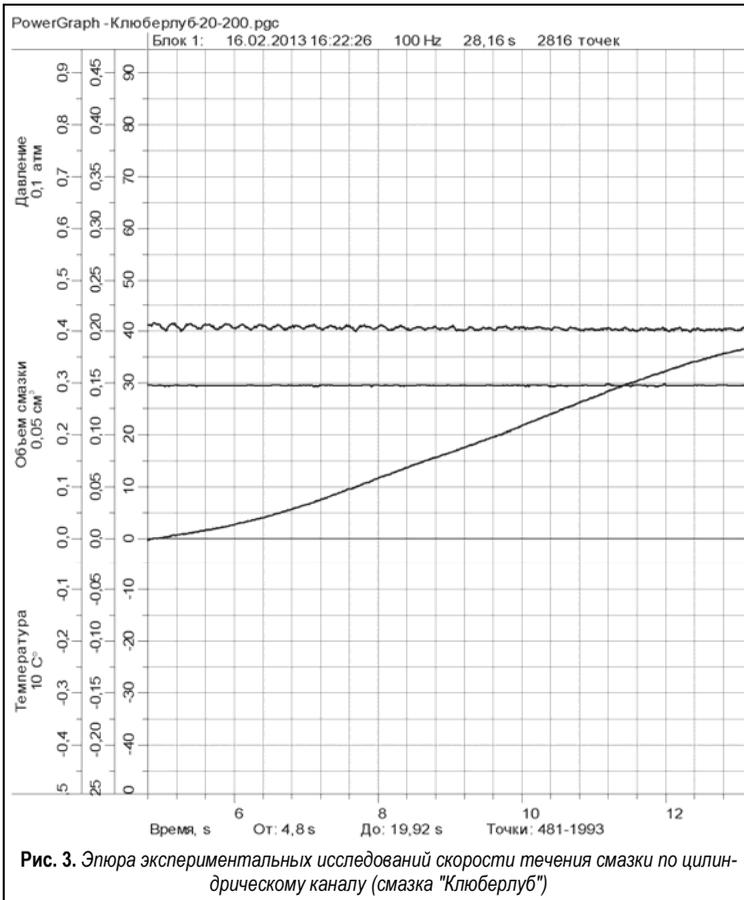


Рис. 2. Прибор для оценки активационных характеристик вязкого течения пластичных смазок



Для проведения экспериментов по исследованию кинетики течения долотных смазок разработан прибор, показанный на рис. 2.

В состав прибора входит стойка 1 с закрепленным на ней кронштейном 2. На конце кронштейна установлена трубка 3, которая является резервуаром для испытуемой смазки. В нижний конец трубки вставляются сменные наконечники 4 с калиброванным отверстием. В центральной части трубки закреплен датчик температуры 5 (хромель-копелевая термопара). В верхнюю часть трубки вставлен шток 6 с фторопластовым поршнем. В верхней части штока соединен с двумя датчиками – тензодатчиком нагрузки 7, создаваемой навеской 8, и тензодатчиком линейных перемещений поршня 9, который указывает на скорость течения смазки при выдавливании ее поршнем через калиброванное отверстие. Сигналы с датчиков поступают на усилитель и далее на аналоговый разъем системы сбора

данных E14-440 фирмы L-Card. Калибровка показаний датчиков, мониторинг, сбор и хранение экспериментальных данных осуществляются при помощи коммерческого программного продукта PowerGraph фирмы "Дисофт". Пример получаемых эпюр экспериментальных данных для смазки "Клуберлуб" показан на рис. 3. Скорость течения смазки определяется как тангенс угла наклона эпюры вертикальных перемещений штока.

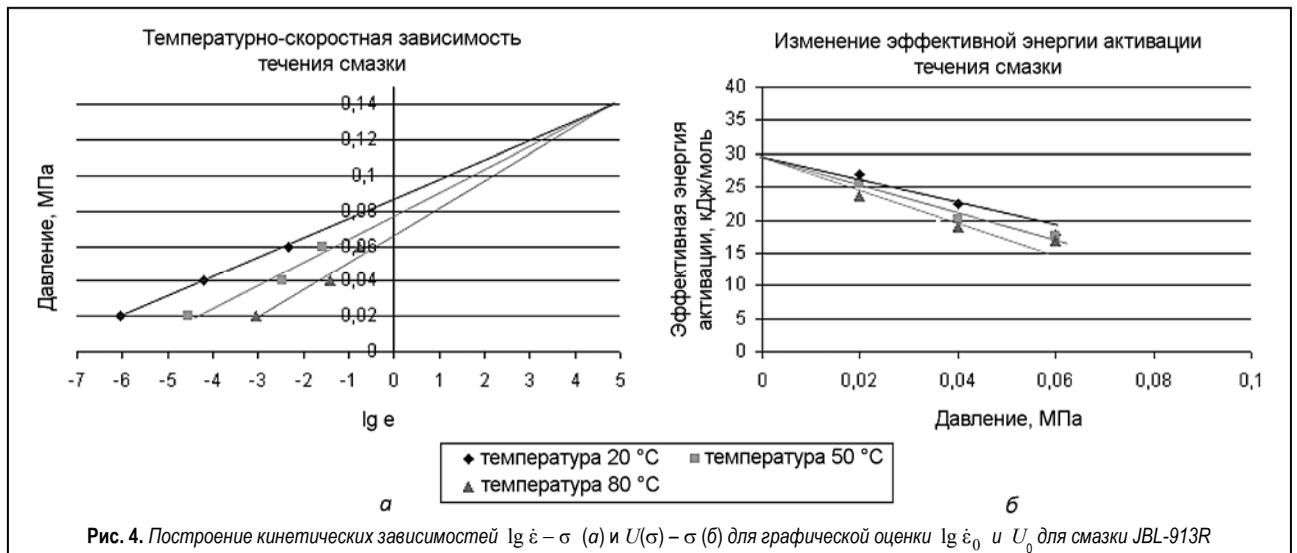
В сводной табл. 1 и на рис. 4–8 приведены результаты экспериментальных термокинетических испытаний долотных смазок, по которым графически были найдены температурно-инвариантные характеристики – энергия активации пластического течения и структурно-чувствительный коэффициент.

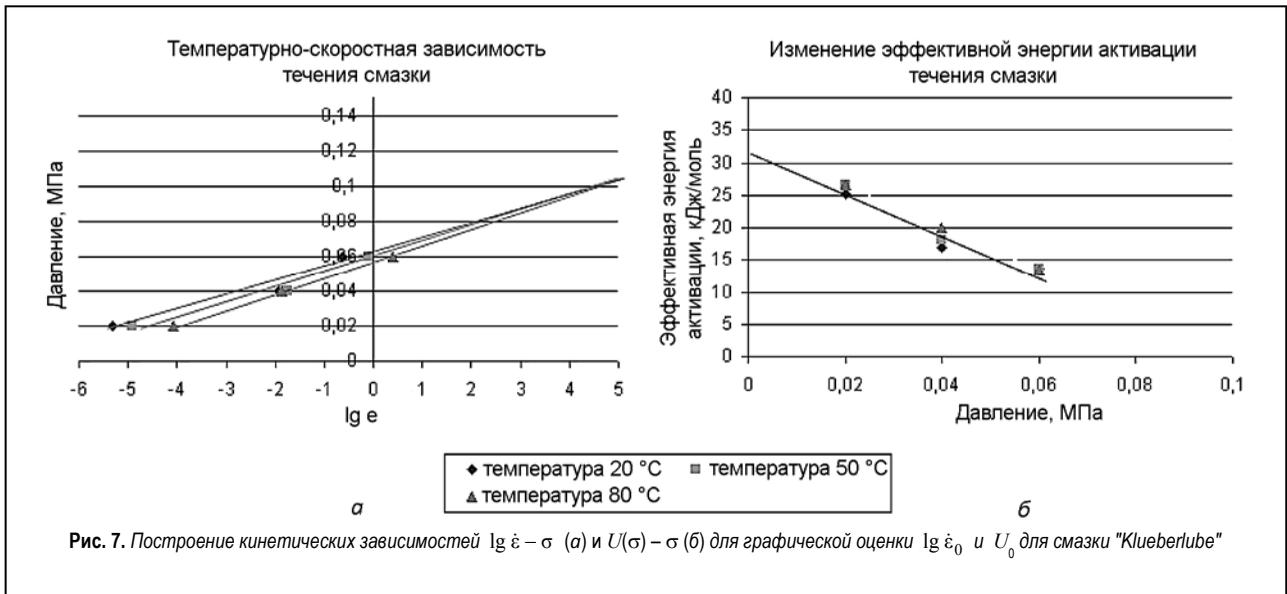
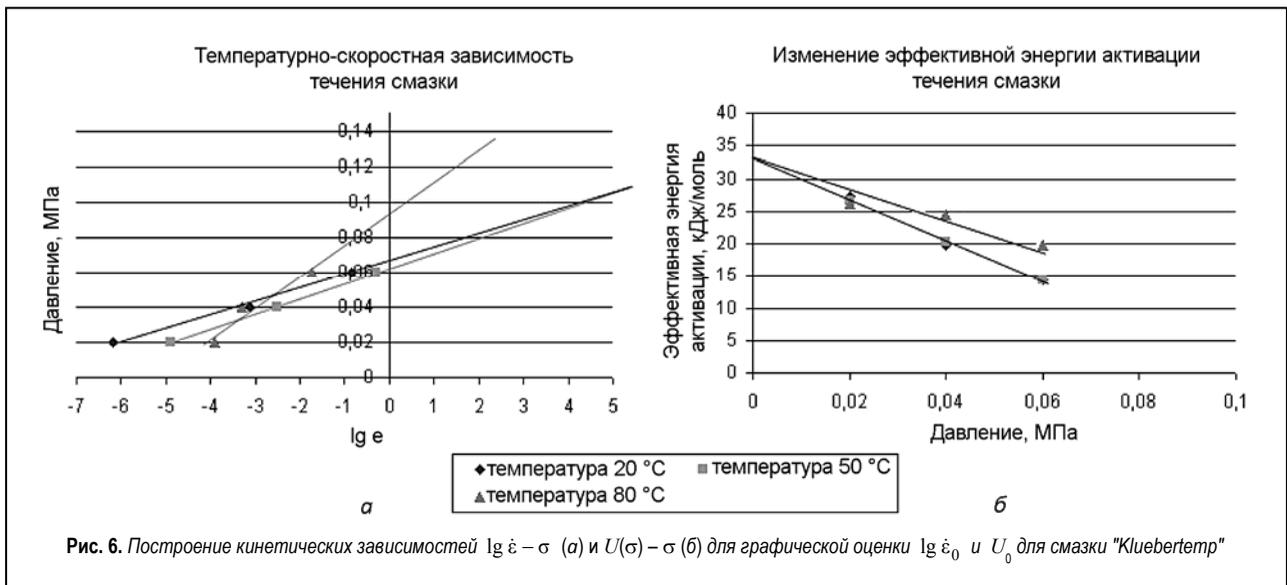
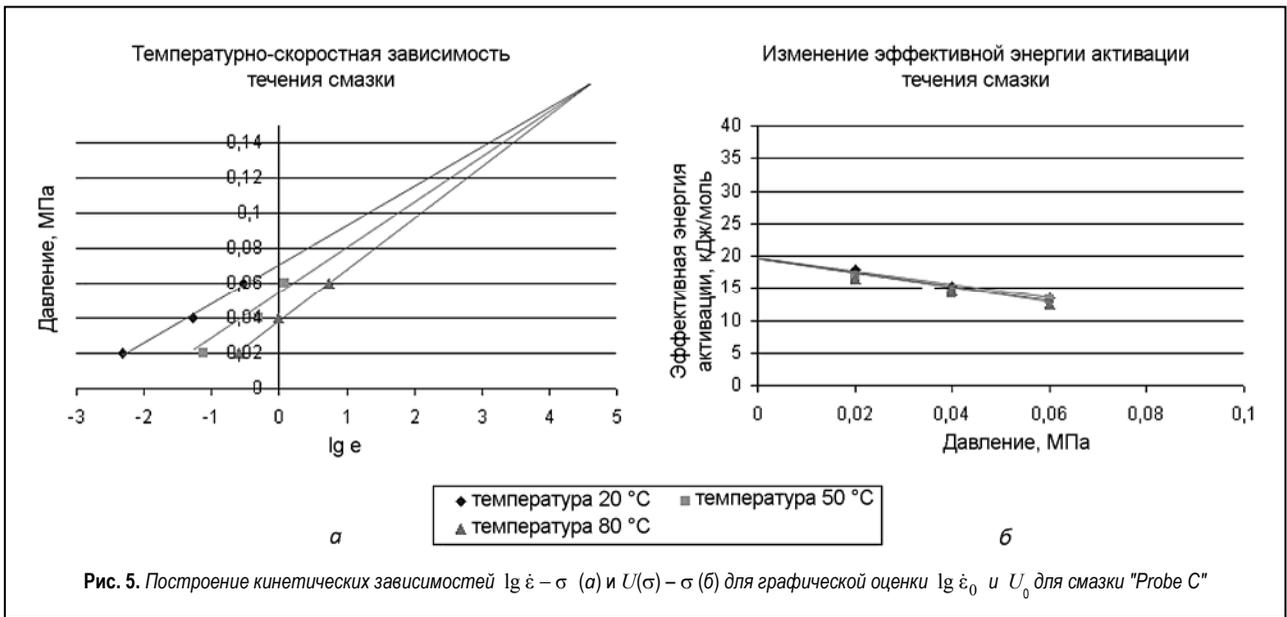
Таблица 1

Экспериментальные данные по оценке скорости течения смазок для долот в цилиндрическом канале

Смазка	Температура, °C	Давление, МПа	Скорость течения, см³/с	lg ε₀	U₀
JBL-913R	20	0,02	0,000009	-6,04576	26,90749
	20	0,04	0,000064	-4,19382	22,39616
	20	0,06	0,0046	-2,33724	17,87354
	50	0,02	0,000029	-4,5376	25,61249
	50	0,04	0,0034	-2,46852	20,05613
	50	0,06	0,027	-1,56864	17,63956
	80	0,02	0,0009	-3,04576	23,61303
	80	0,04	0,038	-1,42022	18,84232
	80	0,06	0,18	-0,74473	16,85987

Смазка	Температура, °C	Давление, МПа	Скорость течения, см ³ /с	lg ε ₀	U ₀
Probe A	20	0,02	0,043	-1,36653	15,50888
	20	0,04	0,58	-0,23657	12,7563
	20	0,06	1,1	0,041393	12,07918
	50	0,02	0,029	-1,5376	17,55622
	50	0,04	0,43	-0,36653	14,4114
	50	0,06	1	0	13,42711
	80	0,02	0,031	-1,50864	19,10183
	80	0,04	0,38	-0,42022	15,90748
Probe C	20	0,02	0,0049	-2,3098	17,8067
	20	0,04	0,053	-1,27572	15,28768
	20	0,06	0,3	-0,52288	13,45374
	50	0,02	0,075	-1,12494	16,44805
	50	0,04	0,51	-0,29243	14,21241
	50	0,06	1,2	0,079181	13,21447
	80	0,02	0,25	-0,60206	16,44116
	80	0,04	1	0	14,67421
Klueberlube	20	0,02	0,000005	-5,30103	25,09333
	20	0,04	0,012	-1,92082	16,85913
	20	0,06	0,23	-0,63827	13,73484
	50	0,02	0,000012	-4,92082	26,64158
	50	0,04	0,018	-1,74473	18,11244
	50	0,06	0,78	-0,10791	13,71688
	80	0,02	0,000082	-4,08619	26,66652
	80	0,04	0,014	-1,85387	20,11503
Kluebertemp	20	0,02	0,00000066	-6,18046	27,23561
	20	0,04	0,00078	-3,10791	19,75087
	20	0,06	0,14	-0,85387	14,26004
	50	0,02	0,000013	-4,88606	26,54823
	50	0,04	0,0031	-2,50864	20,16386
	50	0,06	0,49	-0,3098	14,25906
	80	0,02	0,00012	-3,92082	26,18119
	80	0,04	0,0005	-3,30103	24,36221
JBL-913R	20	0,02	0,0000009	-6,04576	26,90749
	20	0,04	0,000064	-4,19382	22,39616
	20	0,06	0,0024	-2,61979	18,56182
	50	0,02	0,000029	-4,5376	25,61249
	50	0,04	0,0034	-2,46852	20,05613
	50	0,06	0,027	-1,56864	17,63956
	80	0,02	0,0009	-3,04576	23,61303
	80	0,04	0,038	-1,42022	18,84232
80	0,06	0,18	-0,74473	16,85987	





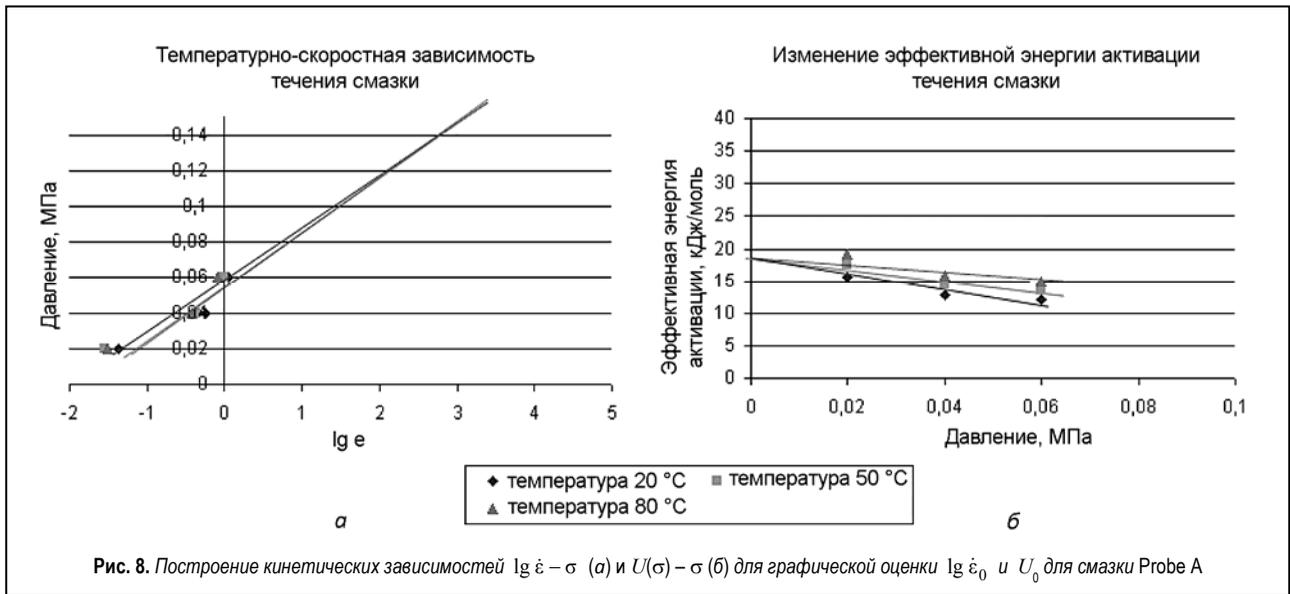


Таблица 2

Значения активационных характеристик дольных смазок

Наименование смазки	U_0 , кДж/моль	Структурно-чувствительный коэффициент γ	Постоянная скорости деформации $\dot{\epsilon}_0$
JBL-913R	30	200	31622
Probe C	20	100	31622
Kluebertemp	33	300	31622
Klueberlube	32	300	31622
Probe A	18	67	31622

Таким образом, используя полученные данные активационных характеристик течения пластичных смазок по цилиндрическим каналам, можно по формуле (1) провести расчет скорости течения смазки при разных значениях давления и температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электронный ресурс: URL: <http://www.teboil-oil.ru/book.html>.
2. ГОСТ 7163. Метод определения вязкости автоматическим капиллярным вискозиметром.
3. ГОСТ 26581-85. Смазки пластичные. Метод определения эффективной вязкости на ротационном вискозиметре.
4. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкости. – Л.: Наука, 1975. – 592 с.
5. Реология полимеров. Об универсальности температурно-инвариантной характеристики вязкости полимеров в конденсированном состоянии / Г.В. Виноградов [и др.] // Докл. АН СССР, 1963. – Т. 150. – № 3. – С. 574–577.
6. Реология полимеров. Об универсальности температурно-инвариантной характеристики вязкости полимеров в конденсированном состоянии / Г. В. Виноградов [и др.] // Докл. АН СССР, 1964. – Т. 154. – № 4. – С. 890–893.
7. Течение аномально-вязких систем при действии двух чистых сдвигов во взаимно перпендикулярных направлениях / Г.В. Виноградов, А.А. Мамаков, В.П. Павлов // Докл. АН СССР, 1959. – Т. 127. – № 2. – С. 362–365.

8. Экспериментальное исследование аномально-вязких тел при сложном напряженном состоянии (к теории смазки) / Г.В. Виноградов, А.А. Мамаков, В.П. Павлов // Изв. АН СССР. ОТН. Мех. и маш., 1959. – № 6. – С. 100–109.
9. Течение аномально-вязких тел в условиях сложного напряженного состояния (к теории смазки) / Г.В. Виноградов, А.А. Мамаков, Н.В. Тябин // Изв. АН СССР. ОТН. Мех. и маш., 1960. – № 2. – С. 65–69.
10. Лиханов В.А., Девятьяров Р.Р. Пластичные смазки: уч. пособие. – Киров: Вятская ГСХА, 2006. – 68 с.

LITERATURA

1. Elektronnyy resurs: URL: <http://www.teboil-oil.ru/book.html>.
2. GOST 7163. Metod opredeleniya vyazkosti avtomaticheskim kapillyarnym viskozimetrom.
3. GOST 26581-85. Smazki plastichnye. Metod opredeleniya effektivnoy vyazkosti na rotatsionnom viskozimetre.
4. Frenkel' Ya.I. Kineticheskaya teoriya zhidkosti. – L.: Nauka, 1975. – 592 s.
5. Reologiya polimerov. Ob universal'nosti temperaturno-invariantnoy kharakteristiki vyazkosti polimerov v kondensirovannom sostoyanii / G.V. Vinogradov [i dr.] // Dokl. AN SSSR, 1963. – T. 150. – № 3. – S. 574–577.
6. Reologiya polimerov. Ob universal'nosti temperaturno-invariantnoy kharakteristiki vyazkosti polimerov v kondensirovannom sostoyanii / G.V. Vinogradov [i dr.] // Dokl. AN SSSR, 1964. – T. 154. – № 4. – S. 890–893.
7. Tечenie anomal'no-vyazkikh sistem pri deystvii dvukh chistykh sdvigoв vo vzaimno perpendikulyarnykh napravleniyakh / G.V. Vinogradov, A.A. Mamakov, V.P. Pavlov // Dokl. AN SSSR, 1959. – T. 127. – № 2. – S. 362–365.
8. Eksperimental'noe issledovanie anomal'no-vyazkikh tel pri slozhnom napryazhennom sostoyanii (k teorii smazki) / G.V. Vinogradov, A.A. Mamakov, V.P. Pavlov // Izv. AN SSSR. OTN. Mekh. i mash., 1959. – № 6. – S. 100–109.
9. Tечenie anomal'no-vyazkikh tel v usloviyakh slozhnogo napryazhennogo sostoyaniya (k teorii smazki) / G.V. Vinogra-

dov, A.A. Mamakov, N.V. Tyabin // Izv. AN SSSR. OTN. Mekh. i mash., 1960. – № 2. – S. 65–69.

10. Likhanov V.A., Devet'yarov R.R. Plastichnye smazki: uch. posobie. – Kirov: Vyatskaya GSKhA, 2006. – 68 s.

Самарский государственный технический университет

443100 Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.
E-mail: s.belokorovkin@vbm.ru

Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина

119991 Россия, г. Москва, Ленинский просп., 65.
