УДК 622.24

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДОГРЕВА ВЫСОКОВЯЗКОЙ И ВЫСОКОЗАСТЫВАЮЩЕЙ НЕФТИ ПРИ ПЕРЕКАЧКЕ ПО ТРУБОПРОВОДУ

А.К.НИКОЛАЕВ, *д-р техн. наук*, *доцент*, *aleknikol@mail.ru*
В.И.КЛИМКО, *канд. техн. наук*, *ассистент*, *klimkovasiliy@gmail.com*
Национальный минерально-сырьевой университет «*Горный*», *Санкт-Петербург*, *Россия*

В статье рассмотрены проблемы транспортирования высоковязкой и высокозастывающей нефти по магистральным трубопроводам. Анализируется возможность образования структурного режима движения нефти при транспортировке ниже температуры застывания нефти. Приведены результаты эксперимента по выявлению неравномерности теплового потока в подземном нефтепроводе.

***Ключевые слова*:** подогрев нефти, трубопроводный транспорт, высокозастывающая нефть, высоковязкая нефть, транспорт нефти.

Среди главных приоритетов Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 г. [3] следует отметить необходимость использования инновационных технологий строительства и содержания транспортной инфраструктуры, а также повышение фондоотдачи и снижение энергоемкости.

Актуальность развития и дальнейшего увеличения нагрузки на систему трубопроводного транспорта подчеркивается и в Энергетической стратегии России на период до 2030 г. [4]. Согласно Энергетической стратегии развитие трубопроводного транспорта нефти будет осуществляться в соответствии с ростом объемов и диверсификации поставок жидких углеводородов как внутренним, так и внешним потребителям. При этом планируется решить задачи увеличения доли трубопроводного транспорта в общем объеме транспортировки нефти.

Еще одной приоритетной задачей является обеспечение необходимых условий для формирования нефтедобывающих регионов с учетом обеспечения баланса между необходимыми объемами транспортировки нефти и пропускной способностью транспортной системы.

Открытие гигантского шельфового нефтегазового месторождения Кашаган в 2000 г. значительно увеличило нагрузку на все экспортные терминалы и магистрали Республики Казахстан. Промышленная добыча на месторождении началась в конце 2013 г. и поставила под вопрос возможности увеличения пропускной способности единственного экспортного трубопровода на территорию Российской Федерации «Узень-Атырау-Самара», перекачивающего нефть с предварительным подогревом. До момента выхода на пиковую добычу Кашагана (50-75 млн т нефти) необходимо разработать и предложить меры по повышению производительности и эффективности работы нефтепровода. Эта задача осложняется аномальными свойствами казахстанской нефти – высокой вязкостью и температурой застывания ниже температуры окружающего трубопровод грунта.

Большинство аномальных нефтей подчиняются закону Бингама. При транспортировке такой нефти могут иметь место два режима течения – турбулентный в начале трубопровода и структурный в конце [2]. Происходит это из-за снижения температуры перекачиваемой нефти и, как следствие, экспоненциального роста коэффициента динамической вязкости.

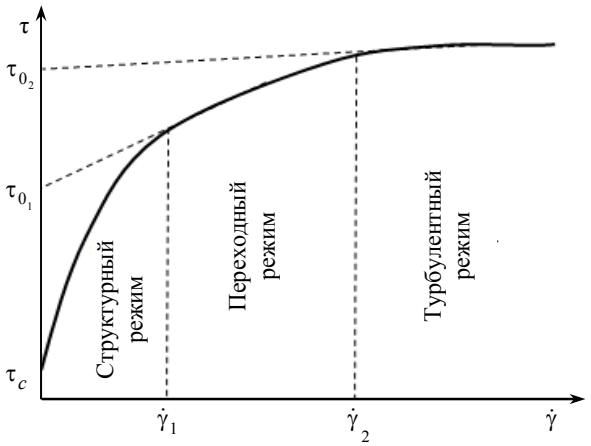


Рис.1. Реологическая кривая перекачиваемой нефти

При движении нефти по «горячему» трубопроводу по мере остывания нефти имеет место обратный процесс – режим течения с ньютоновской вязкостью и разрушенной структурой сменяется режимом с устойчивой структурой [1]. Как видно из рис.1, характер течения меняется и графики γ (τ) становятся нелинейными, а при определенных значениях τ и γ снова выходят на линейные участки, продолжение которых совпадает с началом координат, т.е. реологические кривые приобретают *S*-образный характер с выходом на режим течения с ньютоновской вязкостью предельно разрушенной структуры.

В структурном режиме эпюры движения жидкости выравниваются в линию на некотором отдалении от центра потока, образуя ядро потока (рис.2).

Возникновение структурного режима приводит к образованию ядра потока, частицы которого движутся с одинаковой скоростью, и кольцевого слоя, движущегося между стенкой трубы и ядром. Общий расход в таком случае будет выражаться как сумма расхода ядра потока и кольцевого слоя [5]:

$$Q = Q_0 + Q_1 = \int_0^{r_0} 2\pi r u_0 dr + \int_{r_0}^{R} 2\pi r u dr, \qquad (1)$$

где Q_0 – расход ядра потока; Q_1 – расход кольцевого слоя; r_0, u_0 – радиус и скорость ядра потока соответственно.

Проинтегрировав, приведем слагаемые и получим уравнение Букингама:

$$Q = \left[\frac{\pi\Delta P}{4\mu l}\left(R^2 - r_0^2\right)r_0^2 - \frac{\pi\tau_0}{\mu}\left(R - r_0\right)r_0\right] + \left[\frac{\pi\Delta P}{8\mu l}\left(R^4 - r_0^4\right) + \frac{1}{3}\frac{\pi\tau_0 r_0^2}{\mu}\right] =$$

$$= \frac{\pi R^4}{8\mu l}\left[\Delta P - \frac{4}{3}\left(\frac{2\tau_0 l}{R}\right) + \frac{r_0^4}{R^4}\left(\frac{4}{3}\frac{2\tau_0 l}{R}\frac{R}{r_0} - \Delta P\right)\right]. \qquad (2)$$

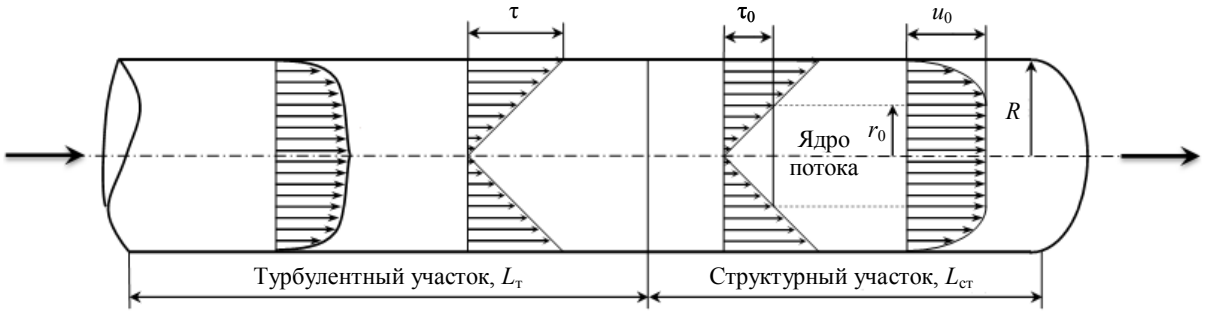


Рис.2. Эпюры скоростей и касательных напряжений по сечению потока вязкопластичной нефти для турбулентного и структурного режимов

Обозначив $\frac{2\tau_0 l}{R} = \Delta P_0$ и с учетом зависимости $\pi r_0^2 \Delta P = 2\pi r_0 l \tau_0$, получим

$$\frac{r_0}{R} = \frac{\Delta P_0}{\Delta P}. \tag{3}$$

Таким образом, коэффициент гидравлического сопротивления можно записать как

$$\lambda = f\left(\frac{\text{И}\varphi(\text{И})}{\text{Re}}\right), \tag{4}$$

где И – параметр Ильюшина, $\text{И} = \frac{\tau_0 d}{w_{\text{ср}}\mu}$.

Уравнение Букингама в «укороченной» форме своим физическим смыслом сводит к минимуму учет влияния ядра потока на движение нефти, тем самым принимая наличие градиента скорости по всему сечению потока.

С увеличением относительного размера ядра погрешность такого решения резко возрастает. Так, например, при распространении решений уравнения Букингама без третьего члена при отношении $r_0/R = \bar{r}_0 = 0{,}5$ погрешность составляет порядка 6 %, но уже при $\bar{r}_0 = 0{,}6$ погрешность составит 17,8 %, а при $\bar{r}_0 > 0{,}75$ данное решение лишается физического смысла и не может быть использовано для инженерных расчетов.

Приравняем уравнение Букингама без третьего члена и формулу Дарси – Вейсбаха:

$$\lambda \frac{l}{2g}\frac{w_{\text{ср}}^2}{d} = \frac{32 w_{\text{ср}}\mu l}{d^2 \rho g} + \frac{16}{3}\frac{l\tau_0}{d\rho g}. \tag{5}$$

Следовательно:

$$\lambda = \frac{64\mu}{d\rho w_{\text{ср}}}\left(1 + \frac{\tau_0 d}{6 w_{\text{ср}}\mu}\right) = \frac{64}{\text{Re}^*}, \tag{6}$$

где Re^* – приведенный критерий Рейнольдса,

$$\text{Re}^* = \frac{\text{Re}}{1 + \frac{\tau_0 d}{6 w_{\text{ср}}\mu}}. \tag{7}$$

Уравнения (6) и (7) являются расчетными формулами, широко используемыми в практике инженерных расчетов. Стоит учитывать, что они получены из уравнения Букингама с допущением о малой значимости третьего члена, вследствие чего считаются приближенными, а приведенный критерий Рейнольдса Re^* не является критерием подобия. Впервые коэффициент гидравлического сопротивления в виде $\lambda = \lambda(\text{Re}^*)$ предложили записывать исследователи Колдуэлл и Бэббит. В своем исследовании они предлагают формулу для определения обобщенного параметра Рейнольдса в следующем виде:

$$\text{Re}^* = \frac{0{,}855\,\text{Re}}{1 + \frac{\tau_0 d}{8 w_{\text{ср}}\mu}}. \tag{8}$$

Учитывая критерий Ильюшина, зависимости (7) и (8) можно обобщить следующим образом:

$$\mathrm{Re}^{*} = \frac{\mathrm{Re}}{1 + \frac{\mathrm{И}}{N}}, \qquad (9)$$

где N – параметр, зависящий от типа нефти, величина которого определяется экспериментально. В формуле (7) он равняется шести, а в формуле (8) – восьми.

С учетом выражения (9) зависимость для расчета коэффициента гидравлического сопротивления при перекачке вязкопластичной жидкости в структурном режиме запишем:

$$\lambda = \frac{64\mu}{d\rho w_{\text{ср}}}\left(1 + \frac{\tau_0 d}{N w_{\text{ср}}\mu}\right) = \frac{64}{\mathrm{Re}}\left(1 + \frac{\mathrm{И}}{N}\right). \qquad (10)$$

Уравнение (10) доказывает, что коэффициент гидравлического сопротивления для вязкопластичной жидкости определяется функциями взаимонезависимых переменных с учетом числа Хедстрема:

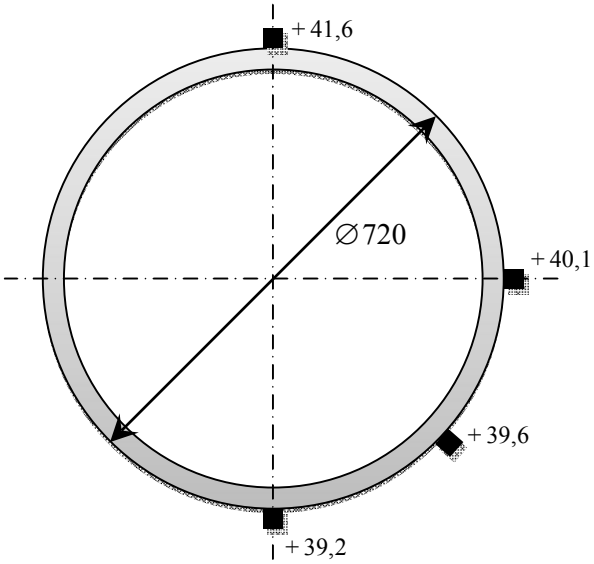


Рис.3. Распределение температур по сечению трубопровода (°С)

$$\mathrm{He} = \mathrm{Re}\,\mathrm{И} = \frac{\tau_0 d^2 \rho}{\mu}. \qquad (11)$$

При движении ньютоновской жидкости зависимость (11) принимает вид $\lambda = 64/\mathrm{Re}$.

Для вязкопластичной жидкости необходимо учитывать критерий Ильюшина И, который отражает соотношение сил пластичности и сил вязкости, и обобщенный параметр Рейнольдса Re^{*}, характеризующий соотношение инерционных сил к силам вязкого трения при движении неньютоновской жидкости.

Как видно из приведенных уравнений, движение вязкопластичной жидкости в структурном режиме не поддается аналитическому решению и требует поиска эмпирических формул для гидравлических расчетов. Для определения критерия Ильюшина необходимо выполнить исследования реологических характеристик перекачиваемой высоковязкой и высокозастывающей нефти, что позволит определить закон изменения реологических характеристик в зависимости от температуры и режима движения.

Единственным на территории России и стран СНГ и крупнейшим в мире «горячим» нефтепроводом, перекачивающим высоковязкую и высокозастывающую нефть, является действующий нефтепровод Узень – Атырау – Самара, большей частью расположенный на территории Казахстана.

Температура застывания перекачиваемой нефти в среднем составляет 9,7 °С, при максимальной температуре окружающего грунта в теплое время года 12 °С. Дополнительно, тепловой поток распределяется неравномерно по глубине грунта, что влияет на профиль теплового потока перекачиваемой нефти. Это, в свою очередь, не позволяет использовать расчетные формулы, основанные на предпосылках зеркального распределения теплового потока по горизонтали.

Проведенные опыты показали, что смещение теплового потока имеет место и разница температур между верхней и нижней образующей трубы может составлять до 2 °С (рис.3).

Указанные недостатки следует учитывать при построении математической модели и определения теплогидравлических характеристик движения нефти по «горячим» нефтепроводам.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Коршак А.А.* Специальные методы перекачки. Уфа: ООО «Дизайн-ПолиграфСервис», 2001. 208 с.
2. *Тугунов П.И.* Нестационарные режимы перекачки нефтей и нефтепродуктов. М.: Недра, 1984. 224 с.
3. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г. / Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-р; URL: http://www.mintrans.ru/activity/detail.php?SECTION_ID=2203#document_13008.
4. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2030 г. / Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р; URL: http://minenergo.gov.ru/aboutminen/energostrategy/.
5. *Nikolaev A.* Ynvestigaeion de los parametrs y los regimens de hidrotrausporte de las hidrromezclas lateritical en la planta «Comandante Pedro» goto Alba (primera parte) / A.Niclolaev, R.Pupo. Cuba, Moa: Mineria y geologia, 1995. № 1.

REFERENCES

1. *Korshak A.A.* Special'nye metody perekachki (*Special pumping methods*). Ufa: OOO «Dizajn-PoligrafServis», 2001, p.208.
2. *Tugunov P.I.* Nestacionarnye rezhimy perekachki neftej i nefteproduktov (*Unsteady conditions of pumping oil and petroleum products*). Moscow: Nedra, 1984, p.224.
3. Transportnaja strategija Rossijskoj Federacii na period do 2030 g. (*Transport Strategy of the Russian Federation for the period up to 2030*). Order of the Government of the Russian Federation of November 22, 2008 N 1734-p; URL: http://www.mintrans.ru/activity/detail.php?SECTION_ID=2203#document_13008 .
4. Jenergeticheskaja strategija Rossijskoj Federacii na period do 2030 g. (*Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2030*). Order of the Government of the Russian Federation of November 13, 2009 N 1715-p; URL: http://minenergo.gov.ru/aboutminen/energostrategy/.
5. *Nikolaev A.*, *Pupo R.* Assesment of parameters and regimens of hidrotransportation of lateritical hidrromezclas on the ground «Comandante Pedro» goto Alba (Part One). Cuba, Moa: Mineria y geologia, 1995. N 1.

SELECTION OF RATIONAL HEATING TEMPERATURE FOR PIPELINE PUMPING HIGH-VISCOSITY AND HIGH POUR POINT CRUDE OIL

A.K.NIKOLAEV, *Dr. of Engineering Sciences*, *Associate Professor*, *aleknikol@mail.ru*
V.I.KLIMKO, *PhD in Engineering Sciences*, *Assistant Professor*, *klimkovasiliy@gmail.com*
National Mineral Resources University (*Mining University*), *St Petersburg*, *Russia*

The article deals with the transportation problems of high-viscosity and high pour point crude oil through pipelines. The possibility of a structural oil movement mode development during transportation below the pour point is analyzed. The results of the experiment for unevenness of the heat flux identification in the underground pipeline are given.

***Key words*:** oil heating, pipeline transport, high pour point oil, high viscosity oil, oil transportation.