

УДК 519.635.4

**С.Ю. Трапезников, В.И. Маларев, А.К. Николаев**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА РАБОТЫ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА С УЧЕТОМ НЕРАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЯ ПАРАФИНОВ НА СТЕНКАХ ТРУБЫ**

*Методом конечных элементов в среде Matlab получено численное решение задачи теплообмена для нефти, движущейся в круглой трубе. Показано влияние неравномерного распределения парафина по сечению трубы на теплообмен нефтепровода с окружающей средой, который можно регулировать изменением толщины слоя изоляции нефтепровода.*

*Ключевые слова: парафин, нефтепровод, теплообмен, уравнение теплопроводности.*

**Семинар № 4**

---

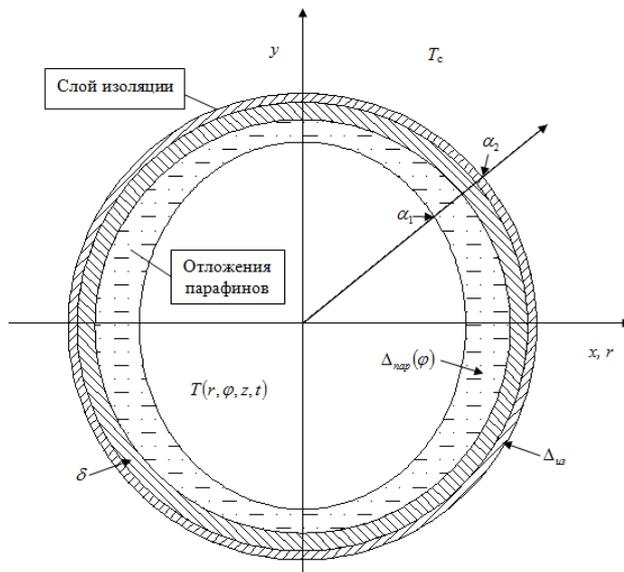
**В** настоящее время наиболее эффективным средством транспортировки нефти и нефтепродуктов считается трубопроводный транспорт. В топливный баланс во все больших размерах вовлекаются нефти с высоким содержанием парафина. Для их перекачки требуются совершенствование существующей и разработка новой технологии, совершенствование методов гидравлического расчета трубопроводов, подготовки нефти к транспортировке, эксплуатации самих трубопроводов и насосных станций (НС).

Высокопарафинистые нефти являются, как правило, высокозастывающими, т.е. теряющими обычные свойства жидкостей при температурах, при которых обычно ведется перекачка. При температурах, близких к температуре застывания, образующаяся в нефти структура придает ей неньютоновские свойства. Внешним проявлением таких свойств является, в частности, отсутствие течения до приложения к жидкости напряжения сдвига, превышающего предельное

для данной нефти напряжение сдвига, разрушающего ее структуру. Для нефти с аномальными свойствами неприменим закон Ньютона о пропорциональности между приложенным к жидкости напряжением сдвига и скоростью сдвига, возникающей под действием этого напряжения [1]. Это значительно усложняет гидравлический и тепловой расчеты нефтепроводов.

В области эксплуатации трубопроводов, транспортирующих высоковязкие нефти и нефтепродукты, накоплен значительный опыт. Транспорт этих жидкостей затруднен из-за их повышенной вязкости, содержания в них парафина, высокой температуры застывания и других реологических особенностей [2]. Однако слабо освещены вопросы температурных режимов работы трубопроводов для вязкой нефти и нефти с аномальными свойствами, что обуславливает актуальность рассматриваемых задач.

Для решения подобных вопросов необходимо довольно точно моделировать режимы работы трубопровода.



**Рис. 1. Отложения парафинов на стенках нефтепровода**

Рассмотрим гидродинамически стабилизированное движение жидкости (нефти), режим течения – ламинарный.

В общем случае, физико-математическая модель теплового режима работы магистрального нефтепровода с учетом неравномерного распределения отложения парафинов на стенках трубы будет представлять собой систему нелинейных дифференциальных уравнения теплопроводности и уравнения движения.

Уравнение теплопроводности Фурье-Кирхгофа в случае движения нефти по трубопроводу в безразмерном виде запишем как

$$\begin{aligned} & \frac{c_p \rho R^2}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{c_p \rho w_{cp} R}{\lambda} w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \\ & + \frac{R^2}{\lambda} \left( \mu(T) \left| \frac{w_{cp}}{R} \frac{\partial w}{\partial r} \right|^{n(T)+1} + \tau_0(T) \left| \frac{w_{cp}}{R} \frac{\partial w}{\partial r} \right| \right) + \\ & + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $c_p$  – удельная теплоемкость нефти;  $\rho$  – плотность нефти;  $\lambda$  – теплопроводность нефти;  $R$  – радиус нефтепровода;  $w_{cp}$  – средняя скорость течения нефти;  $w$  – функция распределения скорости нефти по длине трубопровода и его сечению;  $\mu(T)$ ,  $\tau_0(T)$ ,  $n(T)$  – зависимости вязкости, предельного напряжения сдвига и показателя текучести, описывающего отклонение от линейного характера изменения кривой текучести после превышения предела текучести, от температуры соответственно.

Граничные условия в безразмерном виде выглядят следующим образом:

$$T|_{z=0} = T_0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} + Bi(\varphi)(T - T_c) \Big|_{r=R} = 0, \quad (4)$$

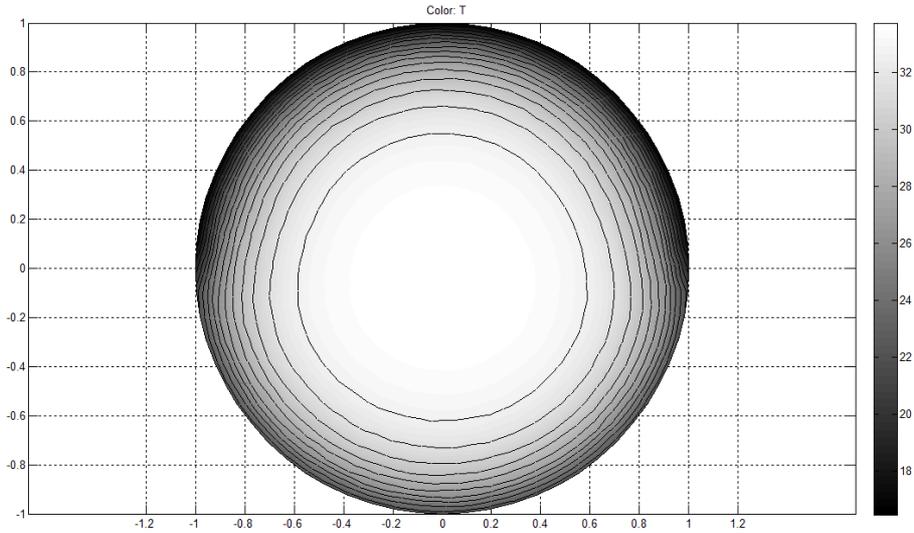
$$\frac{\partial T}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=-\frac{\pi}{2}} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=\frac{\pi}{2}} = 0. \quad (6)$$

где  $Bi(\varphi)$  – безразмерный критерий Био, равный

$$Bi(\varphi) = \frac{\alpha(\varphi)R}{\lambda}, \quad (7)$$

где  $\alpha(\varphi)$  – коэффициент теплоотдачи от жидкости во внешнюю среду,



**Рис. 2. Теплообмен при наличии неравномерного слоя парафина и равномерного слоя изоляции**

равный коэффициенту теплопередачи  $k(\varphi)$ , рассчитываемому по формуле

$$k(\varphi) = \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\Delta_{нар}(\varphi)}{\lambda_{нар}} + \frac{\delta}{\lambda_m} + \frac{\Delta_{уз}}{\lambda_{уз}} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1}, \quad (8)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от потока нефти к слою парафина;  $\Delta_{нар}(\varphi)$  – неравномерный слой отложения парафинов;  $\delta$  – толщина стенки трубопровода;  $\Delta_{уз}$  – толщина слоя изоляции;  $\lambda_{нар}$ ,  $\lambda_m$ ,  $\lambda_{уз}$  – теплопроводность парафина, трубопровода, изоляции соответственно;  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от слоя изоляции в окружающую среду.

Т.к. радиус трубопровода значительно больше толщины слоев парафина, стенки трубы и слоя изоляции, в расчетах использовалась формула для плоской стенки.

Дифференциальное уравнение движения Навье-Стокса в безразмерном виде примет вид [3,4]

$$w_{cp} \rho R \frac{\partial w}{\partial t} r + w_{cp}^2 \rho \frac{\partial P}{\partial z} r = \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu(T) \frac{w_{cp}^{n(T)}}{R^{n(T)}} \left| \frac{\partial w}{\partial r} \right|^{n(T)-1} \frac{\partial w}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_0(T)) \quad (9)$$

со следующими граничными и начальными условиями

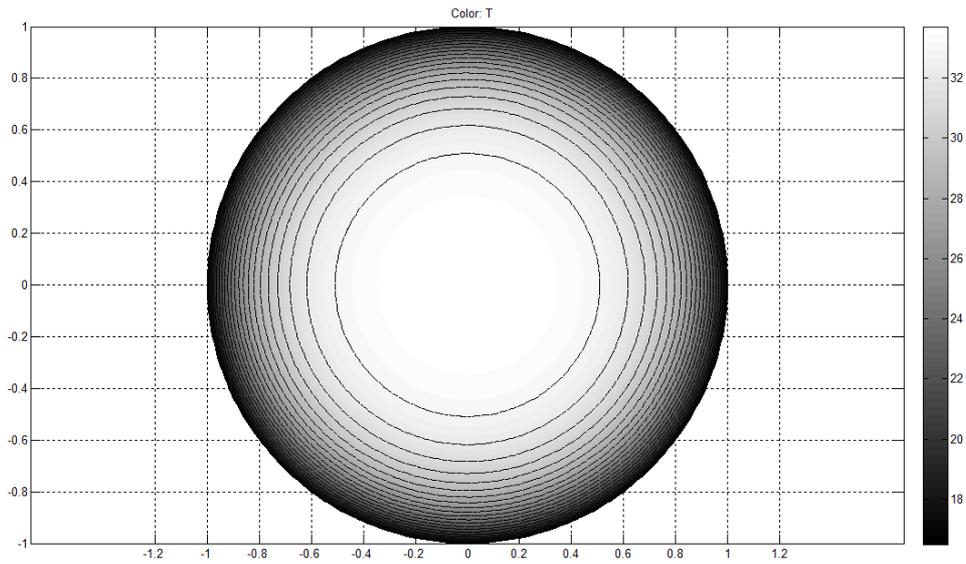
$$w|_{r=R} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial w}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad (11)$$

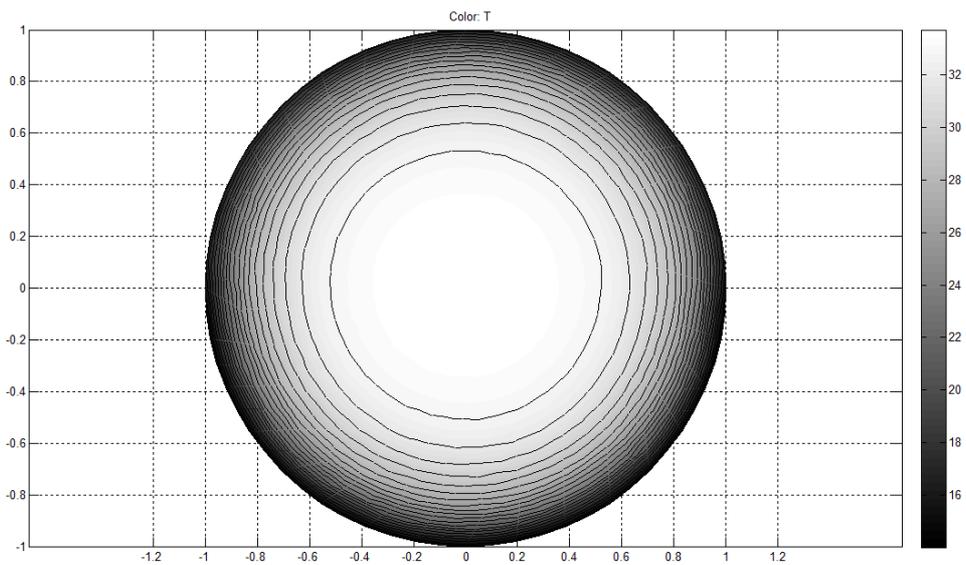
$$w|_{t=0} = 0. \quad (12)$$

Эмпирические зависимости вязкости от температуры  $\mu(T)$ , предельного напряжения сдвига от температуры  $\tau_0(T)$  и зависимость показателя степени модели поведения жидкости от температуры  $n(T)$  аппроксимируются функциями вида

$$f(T) = a e^{bT}, \quad (13)$$



**Рис. 3. Теплообмен при наличии равномерного слоя парафина и равномерного слоя изоляции**



**Рис. 4. Теплообмен при наличии неравномерного слоя парафина и неравномерного слоя изоляции**

где  $a$ ,  $b$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от свойств нефти.

Расчет проводился для высокопарафинистой нефти Нирмалин-

ского месторождения в среде Matlab методом конечных элементов. Полученные экспериментально реологические зависимости для

этой нефти от температуры описываются следующим образом:

$$\mu(T) = 0,0943e^{-0,0591T}, \quad (14)$$

$$\tau_0(T) = 9,1449e^{-0,1173T}, \quad (15)$$

$$n(T) = 0,834e^{0,0011T}. \quad (16)$$

На рис. 2, 3, 4 представлены результаты моделирования теплообмена между потоком нефти, транспортируемой по трубопроводу диаметром

529 мм с толщиной стенки 8 мм, и окружающей средой ( $T_c = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ).

Анализ полученных результатов показывает, что неравномерность отложения парафинов на стенках нефтепровода влияет на процессы теплообмена с окружающей средой. На основании этого можно предположить, что нанесение на нефтепровод переменного по толщине защитного слоя позволит оптимальным образом обеспечить его теплоизоляцию.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии / Пер. с англ. И.А. Лавыгина; Под ред. В.Г. Куличихина – М.: КолосС, 2003. – 312 с.
2. Коршак А.А. Специальные методы перекачки. – Уфа.: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2001. – 208 с.
3. Штукатуров К.Ю. Моделирование режимов работы нефтепровода, перекачивающего высоковязкие нефти // Методы. Алгоритмы. Программы. – 2004. – № 1(5). – С. 54–60.
4. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. – М.: Энергия, 1967. – 412 с.

■ ИАБ

### Коротко об авторах

Трапезников С.Ю. – аспирант, кафедра Транспорта и хранения нефти и газа, Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (технический университет), sytrapeznikov@gmail.com;  
 Маларев В.И. – кандидат технических наук, доцент, кафедра Электротехники и электромеханики, Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (технический университет),  
 Николаев А.К. – доктор технических наук, доцент, кафедра Транспорта и хранения нефти и газа, Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (технический университет), rectorat@spmi.ru



### ДИССЕРТАЦИИ

#### ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
<b>КАРАГАНДИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ</b>			
ЦОЙ Наталья Константиновна	Разработка способа обеспыливания взвешенных частиц техногенных процессов в отходящих газах	05.26.03	к.т.н.