

# Управление температурным полем металлической насосно-компрессорной трубы добычи высокопарафинистой нефти

Ю. В. Ильюшин

Санкт-Петербургский горный университет  
Санкт-Петербург, Россия  
ilyushin\_y@spmi.ru

И. М. Новожилов

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
Санкт-Петербург, Россия  
novozhilovim@list.ru

**Аннотация.** В настоящее время в балансе добываемого углеводородного сырья существенно возросла доля высокопарафинистой нефти, отличающейся высокой температурой застывания. В этой связи возникают проблемы её добычи, подготовки, транспортировки и переработки, обусловленные значительным повышением вязкости, а также потерей текучести при пониженных температурах окружающей среды. Отложения парафинов в призабойной зоне пласта и на поверхности нефтепромыслового оборудования является одним из серьезных осложнений при эксплуатации скважин и трубопроводного транспорта. Парафиновые отложения снижают фильтрационные характеристики пласта, закупоривают поры, уменьшают полезное сечение насосно-компрессорных труб и, как следствие, значительно осложняют добычу и транспортировку нефти, увеличивают расход электроэнергии при механизированном способе добычи, приводят к повышенному износу оборудования.

Одним из вариантов решения указанных проблем является применение устройств дополнительного нагрева в процессе добычи и транспортировки. Так же необходимы прогнозные данные по поведению смесей в процессе их перекачки и переработки, а также разработка комплекса мероприятий, позволяющих в возникших конкретных климатических условиях осуществить транспорт, переработку и хранение сырьевых композиций. Именно этому и посвящена данная статья

**Ключевые слова:** системный анализ; управление; автоматизация; нефть

## I. ВВЕДЕНИЕ

Технологические процессы добычи, транспорта и подготовки нефти в большой степени зависят от значения вязкостей.

Вязкость является наиболее распространенной характеристикой реологического (текучего) поведения жидкостей. Для ньютоновских объектов она является исчерпывающей. Для неньютоновских объектов вязкость не может полностью охарактеризовать свойство текучести, но если вещество перерабатывается при помощи «жидкостных» технологических аппаратов и

соответствующей технологии, его можно назвать «жидкообразным» и характеризовать текучесть набором эффективных значений.

При транспорте нефти по трубопроводу, происходит перемещение метастабильной (стабильная склонная к изменению) углеводородной жидкости, склонной к выделению твердой фазы, в технологическом диапазоне сопровождающееся изменением температуры. Переход от однородной жидкости к гетерогенной системе – фазовый переход имеет реологически значимые последствия и сопровождается изменением текучести.

Механизм потери текучести может быть различен. В результате «структурного застывания» появляется возможность выделить в рассматриваемом объекте различные уровни вязкости – макроскопический, определяющий течение и механическое сопротивление движению большого погруженного тела, и микроскопический, определяющий, например, диффузию низкомолекулярных компонентов.

Образование структуры, как правило, включает несколько стадий. Процесс начинается взаимодействием первичных частиц. Таким образом, первой стадией можно считать их формирование. На второй стадии в результате их взаимодействия образуются коагуляционные контакты, и далее происходит медленный процесс перерастания последних в фазовые. К настоящему времени уже сформировалось мнение, что динамика и условия появления механически обратимых коагуляционных контактов определяют дальнейшую эволюцию системы. Первая стадия слабо проявляется в относительно грубом реологическом эксперименте, а вторая стадия, характеризующаяся неньютоновским реологическим поведением, сильно зависит от гидродинамических условий. Это приводит к тому, что изучение термоиндуцированных фазовых переходов при различных скоростях деформации приводит к разным значениям температуры перехода. Для устранения данной проблемы установим вдоль всей плоскости насосно-компрессорной трубы (НКТ) и труб транспортной системы небольшие импульсные секционные нагреватели. Для регулирования

данной системы устройство управления должно создавать воздействия, на изменение температурного поля от заданного значения. Такого рода отклонения должны фиксироваться в определённых точках в определённое время. Тогда их можно будет зафиксировать. Таким образом, необходимо производить расчет места и времени включения нагревательных элементов.

## II. АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА

Рассмотрим дискретное управление цилиндрическим изотропным стержнем с радиусом  $R_2$  длиной  $l$  и теплопроводностью материала  $a^2$ . Секционный нагревательный элемент  $\xi_i$ , разместим на боковой границе трубы. Управление данным секционным нагревательным элементом будем вести с помощью релейных элементов. Концы трубы будут изолированы. Рассмотрим математическую модель и проведем синтез управляющих воздействий на трубы:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2},$$

где начальные граничные условия:

$$T(x,0) = T_0(x); \quad T(0,t) = T(l,t) = 0.$$

Требуется найти параметры решения функции  $T(x,t)$ , которые выбираются согласно заданным начальным условиям, в качестве которых могут выступать равенства, неравенства или условия, где синтез проводится с использованием аналитических решений начально-краевых задач. Для представления обобщённого решения можно использовать формальный ряд

$$T(x,t) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} a_n \exp \left[ - \left( \frac{n\pi a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{n\pi}{l} x.$$

$$\frac{2a_1}{l} \exp \left[ - \left( \frac{\pi a}{l} \right)^2 t^* \right] \sin \frac{\pi}{l} x^* = T_{зад}(x^*, t^*).$$

$$T(x,t) \approx \frac{2a_1}{l} \exp \left[ - \left( \frac{\pi a}{l} \right)^2 t_i \right] \sin \frac{\pi}{l} x^* = T_{i,зад}(x^*, t_i).$$

$$T(x_7,t) = \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[ - \left( \frac{n\pi a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{n\pi}{l} x_7 \sin \frac{n\pi}{l} \xi_i + \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[ - \left( \frac{n\pi a}{l} \right)^2 (t - \tau_1) \right] \sin \frac{n\pi}{l} x_7 \sin \frac{n\pi}{l} \xi_1$$

В более сокращенном виде для первых трех точек получим следующие результаты:

$$T(x_1,t) = T(x_1,t, \tau_0) + T(x_1,t, \tau_1),$$

$$T(x_2,t) = T(x_2,t, \tau_0) + T(x_2,t, \tau_1),$$

$$T(x_1,t) = T(x_1,t, \tau_0) + T(x_1,t, \tau_1).$$

С течением времени  $\tau_2$  в точке  $x_3$  функция, убывая, достигла заданного значения температурного режима  $T_{зад}$ .

Используя ряд с конечным числом слагаемых, решение поставленной задачи сведется к следующему уравнению:

$$T(x_i, t_j) = \frac{2}{l} \sum a_n \exp \left[ - \left( \frac{n\pi a}{l} \right)^2 t_j \right] \sin \frac{n\pi}{l} x_i = T_{i,j,зад}(x_i, t_j).$$

Применяя функцию Грина, получим следующие выражения: действие первого источника на семь последующих датчиков

$$T(x_1, t, \tau_0, \xi_1) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^k \exp \left[ - \left( \frac{n\pi a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{n\pi}{l} x_1 \sin \frac{n\pi}{l} \xi_1.$$

Действие всех источников, на датчики  $x_1, x_2, x_3$ :

$$T(x_1, t, \tau_0) = \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[ - \left( \frac{n\pi a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{n\pi}{l} x_1 \sin \frac{n\pi}{l} \xi_i.$$

В общем виде, для  $N$ -го количества источников и датчиков  $d$ , выражение функции начального нагрева, при точки наблюдения  $x_j$  будет выглядеть следующим образом

$$T(x_j, t, \tau_0) = \sum_{i=1}^d \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[ - \left( \frac{n\pi a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{n\pi}{l} x_j \sin \frac{n\pi}{l} \xi_i$$

где  $j = 1, 2, \dots, d$ .

Через некоторое время температура трубы (пренебрежимо малой толщины стержня) будет понижаться из-за действия нулевых граничных условий. В точке изотропного стержня  $x_j$  функция,  $T(x_j, t, \tau_0)$  убывая, достигнет заданного температурного режима  $T_{зад}$ . Скажем, при  $t = \tau_1$ , включается импульсный источник с релейным принципом управления  $\xi_j$ , соответствующий датчику  $x_j$ . Тогда например, в момент времени  $\tau_1$  температурный источник  $x_1$  выводит значение равно заданному температурному режиму  $T_{зад}$ . Далее включается источник  $\xi_1$  и воздействует на один датчик.

$$T(x_1, t, \tau_1, \xi_1) = \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[ - \left( \frac{n\pi a}{l} \right)^2 (t - \tau_1) \right] \sin \frac{n\pi}{l} x_1 \sin \frac{n\pi}{l} \xi_1.$$

Рассчитаем суммарное температурное воздействие всех датчиков на все источники:

После этого включается релейный импульсный источник  $\xi_3$ , который поставлен в соответствие датчику  $x_3$  и создает температурное воздействие на все точки стержня. На каждую точку стержня продолжается воздействие функции начального нагрева. На основании выше изложенного получим типовое значение для одного датчика:

$$T(x_1, t) = \sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[ - \left( \frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_1 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i +$$

$$\sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[ - \left( \frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_1) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_1 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_1 + \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[ - \left( \frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_2) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_1 \sin \frac{\pi n}{l} \xi_3$$

Тогда получим следующие соотношения температурных полей:

$$T(x_1, t) = T(x_1, t, \tau_0) + T(x_1, t, \tau_1) + T(x_1, t, \tau_2) + \dots + T(x_1, t, \tau_p);$$

$$T(x_2, t) = T(x_2, t, \tau_0) + T(x_2, t, \tau_1) +$$

$$T(x_2, t, \tau_2) + \dots + T(x_2, t, \tau_p);$$

$$T(x_3, t) = T(x_3, t, \tau_0) + T(x_3, t, \tau_1)$$

$$T(x_3, t, \tau_2) + \dots + T(x_3, t, \tau_p).$$

Влияние же всех функций на все источники можно выразить следующим уравнением

$$T(x, t) = \frac{2}{l} \left[ \exp \left[ - \left( \frac{\pi a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi}{l} x \sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l} \xi_i + \right.$$

$$\left. \exp \left[ - \left( \frac{3\pi a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{3\pi}{l} x \sum_{i=1}^{d/3} \sin \frac{3\pi}{l} \xi_i + \right.$$

$$\left. + \exp \left[ - \left( \frac{5\pi a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{5\pi}{l} x \sum_{i=1}^{d/5} \sin \frac{5\pi}{l} \xi_i + \dots \right].$$

У произвольной фиксированной точки отрезка:

$$T(x_j, t) = \sum_{i=1}^d \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[ - \left( \frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_j \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i +$$

$$+ \sum_p \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[ - \left( \frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_p) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_j \sin \frac{\pi n}{l} \xi_{z(p)}$$

**Численный эксперимент.** Для объекта исследования возьмём следующие характеристики

1. Нефть Соболиного месторождения ( $\eta = 120$  мПа·с,  $\rho = 0,850$  г/см<sup>3</sup>).
2. Нефть Арчинского месторождения ( $\eta = 125$  мПа·с,  $\rho = 0,860$  г/см<sup>3</sup>).

Согласно рис. 1 кристаллизация парафинов наступает при температуре  $-2$  °С.

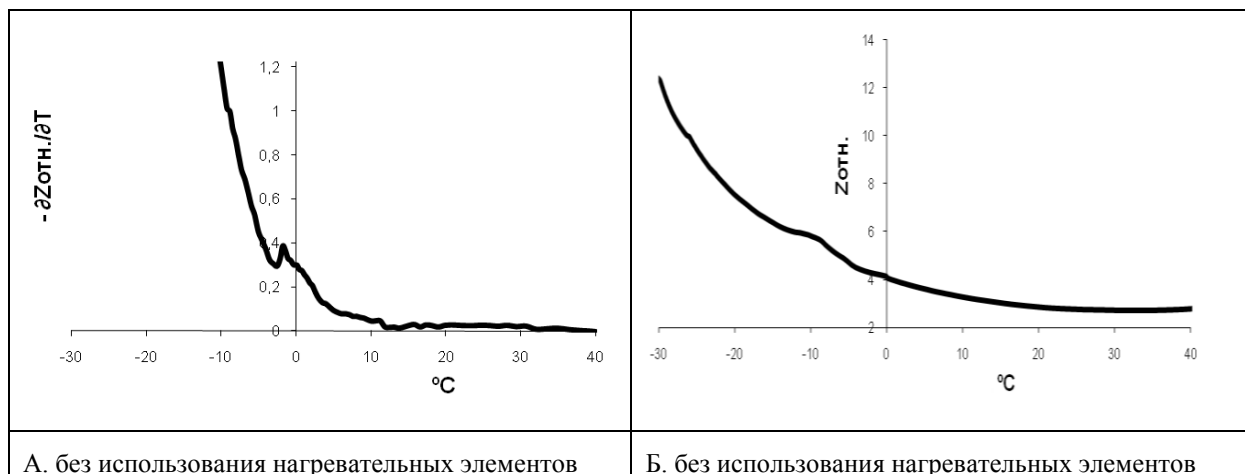


Рис. 1. Зависимость механического сопротивления  $-\delta Z_{онт.}/\delta t$  от температуры образца нефти Соболиного месторождения

После добавления включения нагревательных элементов начало кристаллизации парафина смещено в зону низких температур на  $7$  °С, что подтверждает влияние нагревательных элементов. Увеличение содержания парафинов в нефтяных дисперсных системах обуславливает их начало кристаллизации в положительных температурных диапазонах. Рассмотрим образец нефти Арчинского месторождения с содержанием парафинов  $6,6$  %. На рис. 1 приведены результаты зависимости относительного механического

сопротивления от температуры. Температура застывания данной нефти наступает при  $+10$  °С, что создает значительные проблемы при перекачке и извлечении из пластов залегающих такого типа нефтей. Начало кристаллизации парафина в нефти Арчинского месторождения изменяется незначительно, на  $2$  °С холоднее чем у исходного образца. Однако, на рис. 2 б отчетливо виден и второй максимум при  $T=2$  °С. Это можно объяснить, вероятно, сложным, двухфазным механизмом кристаллизации.

Также как и в случае нефти Соболиного месторождения, представленные зависимости для Арчинской нефти состоят из двух основных линейных

участков. При этом резкое возрастание относительного механического сопротивления нефти, что значительно ниже, чем у исходного образца.

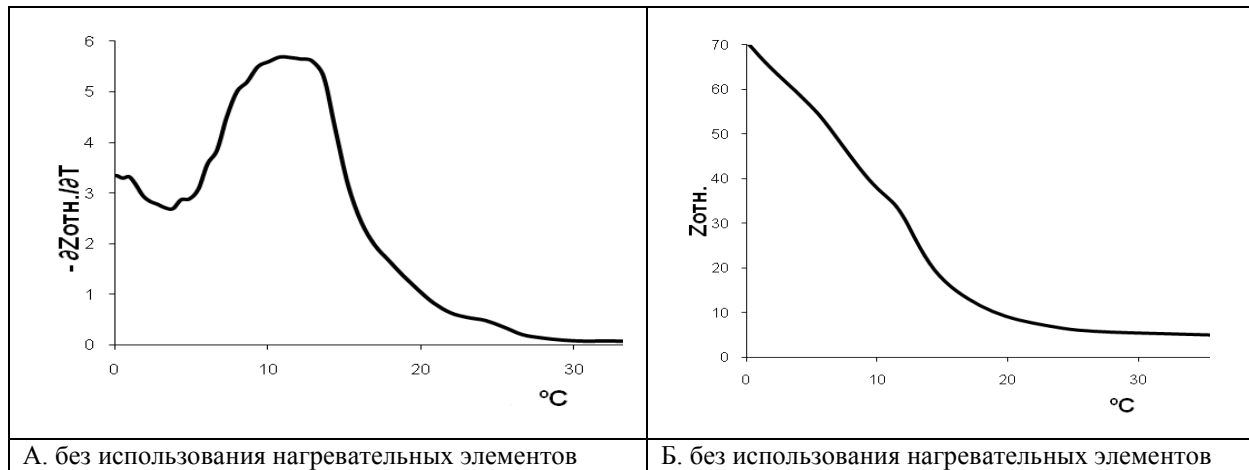


Рис. 2. Зависимость механического сопротивления  $Z_{отн.}$  (а) и  $-dZ_{отн.}/dT$  (б) от температуры образца нефти Арчинского месторождения

Резкое увеличение  $Z_{отн.}$  исходного образца начинается при  $T=19-20^{\circ}C$ . После введения присадок область интенсивного возрастания  $Z_{отн.}$  смещается на  $5-6^{\circ}C$  и практически повторяет форму зависимости, соответствующую исходному образцу (таблица).

ТАБЛИЦА 1 НАЧАЛО КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НЕФТЕЙ ПРИ ДОБАВЛЕНИИ ПРИСАДОК

Название образца	Температура кристаллизации, $^{\circ}C$
Соболиная нефть	-2
При внешнем нагреве	-10
Арчинская нефть	+10
При внешнем нагреве	+8

Таким образом разработанные методики показывают реальный технический эффект от внедрения.

### III. ВЫВОДЫ

Особенности систем с распределёнными параметрами требуют создания аппарата для их анализа и синтеза на базе нетрадиционных для классической теории управления математических средств. Существуют различные формы описания моделей систем с распределёнными параметрами в виде дифференциальных уравнений в частных производных; структурное представление систем с распределёнными параметрами, которое опирается на фундаментальное решение краевой задачи; представление распределённых объектов в виде комплексных передаточных коэффициентов по собственным вектор функциям оператора объекта.

Для анализа объектов управления описываемых нелинейными уравнениями в частных производных, чаще всего используются аппроксимационные методы. Однако следует отметить, что на сегодняшний день методика аппроксимации распределённых систем специальным образом подобранной сосредоточенной системой не разработана, при этом, во многих задачах процесс

аппроксимации является неустойчивым относительно погрешностей промежуточных вычислений. Разработкой моделей рассматриваемых систем и методик синтеза в последнее время занимается большое число авторов в виду безусловной актуальности и большой востребованности технических решений на практике. При этом многие работы заканчиваются этапами моделирования систем, предполагая дальнейший параметрический синтез, применение которого связано с решением ряда проблем. Приведенная методика рассматривает возможность замены сплошных нагревательных элементов на импульсные элементы. Новизна и техническая особенность данной статьи заключается в следующем:

1. Использование инновационного подхода к нагреву гексагональных карбидкремниевых структур является актуальной задачей.
2. Данная методика не рассчитана исключительно на гексагональные карбидкремниевые структуры, а имеет общий вид, который может быть легко адаптирован для других сплавов.
3. Предложенная методика позволит снизить конечную стоимость разработки месторождения и его эксплуатацию путем экономии на энергоресурсах.
4. Данная методика, совместно с программно-аппаратным комплексом для стабилизации температурного поля позволит решать широкий круг задач необходимых современной промышленности.

Таким образом, разработанная методика может быть обобщена на класс систем, для которых существует фундаментальное решение (функция Грина). При этом, усложнение выражения функции Грина, естественно вызывает увеличение затрат на вычислительный процесс. Однако, если сравнить затраты которые сейчас

расходуются на низкое КПД нагревательных элементов, то использование математического моделирования для расчета места расположения нагревательных элементов оправдано.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kukharova T.V., Pershin I.M. Conditions of Application of Distributed Systems Synthesis Methods to Multidimensional Object/ 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, 2019. № 8602749 DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602749
- [2] Kukharova T.V., Utkin V.A., Boev I.V. Observation and Prediction Systems Modeling for Human Mental State/ 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, 2019 № 8602831 DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602831
- [3] Martirosyan A.V. Application of Fourier Series in Distributed Control Systems Simulation [Text] / A.V. Martirosyan, K.V. Martirosyan, A.B. Chernyshev // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EConRus) (January 28-31). St.Petersburg, 2019. P. 609–613. DOI: 10.1109/EConRus.2019.8656865
- [4] Martirosyan A.V. Methods of distributed systems' structured modeling [Text] / A.V. Martirosyan, K.V. Martirosyan, A.B. Chernyshev // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (February 2-3). St.Petersburg, 2016. P. 283–289. DOI: 10.1109/EConRusNW.2016.7448175
- [5] Martirosyan A.V. Quality improvement information technology for mineral water field's control [Text] / A.V. Martirosyan, K.V. Martirosyan // 2016 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (October 4-11). Nalchik, 2016. P. 147-151. DOI: 10.1109/ITMQIS.2016.7751925
- [6] Schipachev A. Optimum Conditionsof Turning and Surface Plastic Deformation DeterminationTaking into Account Technological Heredity (2018) Journal of Physics: Conference Series 1118(1),012036 DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012036
- [7] Samigullin G., Schipachev A., Samigullina L. CONTROL of PHYSICAL and MECHANICAL CHAR-ACTERISTICS of STEEL by SMALL PUNCH TEST METHOD. // (2018) Journal of Physics: Conference Series 1118(1),012038. DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012038
- [8] Verzhbitskiy K., Samigullin G., Schipachev A. Increasing service life of chuck unit of tank during cyclic loading // (2018) Journal of Physics: Conference Series 1118(1),012040 DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012040
- [9] Shipachev A.M., Nazarova M.N. Phenomenon of low-alloy steel parametrization transformation at cyclic loading in low-cyclic area // (2018 ) IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 87(9),092017 DOI: 10.1088/1755-1315/87/9/092017