

Ю.В. Ильюшин**АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДОБЫЧЕЙ ВЫСОКОПАРАФИНОВОЙ НЕФТИ**

Трудно извлекаемые нефти определяются достаточно большим числом физико-химических характеристик и одним из факторов отнесения нефтей к трудноизвлекаемым среди химических свойств является высокое содержание парафинов. Известно, в России в 2017 г. добыто 510 млн т нефти, из них – более 75 % составили нефти с высоким содержанием парафинов. Постоянное увеличение в общем объеме добываемой нефти доли таких нефтей ставит перед нефтяниками ряд сложных технических проблем. 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. 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. В данной статье построена математическая модель движения высокопарафинистой нефти по колонне насосно-компрессорной трубы, рассмотрен способ формирования температурного поля с помощью импульсных секционных нагревателей, синтезирована система управления температурным полем, поставлен численный эксперимент на образце нефти Соболиного месторождения.

Анализ; наблюдение; месторождение; добыча; нефть.

Yu.V. Ilyushin**ANALYSIS OF SPATIALLY DISTRIBUTED TEMPERATURE FIELDS IN PULSED CONTROL SYSTEM FOR EXTRACTION OF HIGH-PARAFFINE OIL**

Hard-to-recover oils are determined by a sufficiently large number of physico-chemical characteristics and one of the factors that classify oils as difficult-to-recover among chemical properties is a high paraffin content. It is known that in 2017, 510 million tons of oil was extracted in Russia, more than 75 % of that is oil with a high content of paraffins. The constant increase in the share of such oils in the total volume of oil produced poses a number of difficult technical problems for oilmen. Paraffin deposits in the bottomhole formation zone and on the surface of oil field equipment is one of the serious complications in the operation of wells and pipeline

transport. Paraffin deposits reduce the filtration characteristics of the reservoir, clog pores, reduce the useful section of tubing and, as a result, significantly complicate the production and transportation of oil, increase power consumption in a mechanized method of production, lead to increased equipment wear. Technological processes of production, transport and preparation of oil to a large extent depend on the value of viscosities. Viscosity is the most common characteristic of the rheological (fluid) behavior of liquids. For Newtonian objects, it is exhaustive. For non-Newtonian objects, viscosity cannot fully characterize the property of fluidity, but if a substance is processed using "liquid" technological devices and the corresponding technology, it can be called "liquid-like" and characterized by a set of effective values. When transporting oil through a pipeline, a metastable (stable, inclined to change) hydrocarbon liquid is displaced, prone to precipitation of a solid phase, in the technological range accompanied by a change in temperature. The transition from a homogeneous fluid to a heterogeneous system - a phase transition has rheologically significant consequences and is accompanied by a change in fluidity. The mechanism of loss of turnover can be different. As a result of "structural solidification," it becomes possible to isolate various levels of viscosity in the object under consideration - macroscopic, determining the flow and mechanical resistance to movement of a large submerged body, and microscopic, determining, for example, the diffusion of low molecular weight components. In this article, a mathematical model of the motion of highly paraffinic oil along the tubing string is constructed, the method of forming the temperature field using pulsed sectional heaters is considered, the temperature field control system is synthesized, and a numerical experiment is run on a sample of oil from the Sable field.

Analysis; observation; deposit; extraction; oil.

Введение. Трудно извлекаемые нефти определяются достаточно большим числом физико-химических характеристик и одним из факторов отнесения нефтей к трудноизвлекаемым среди химических свойств является высокое содержание парафинов. Известно, в России в 2017 г. добыто 510 млн т нефти, из них – более 75 % составили нефти с высоким содержанием парафинов. Постоянное увеличение в общем объеме добываемой нефти доли таких нефтей ставит перед нефтяниками ряд сложных технических проблем [1–20].

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.

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

Вязкость является наиболее распространенной характеристикой реологического (текущего) 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 рассмат-

риваемом 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.

Существующие методы решения. Для борьбы с асфальтосмолопарафиновыми отложениями (АСПО) могут быть применены следующие методы:

Тепловые методы

Технология применения теплоносителя предусматривает, нагрев жидкости в специальных нагревателях — котельных установках передвижного типа и подачу ее в скважину способом прямой или обратной промывки.

Для этой цели промышленность выпускает специальные агрегаты – депарафинизационные передвижные установки, оснащенные котлами — подогревателями жидкости до температуры 150 °С и насосами, развивающими давление до 16 Мпа. Нагретый агент может циркулировать в скважине определенное время, обеспечивая расплавление и удаление отложений.

Наиболее предпочтительной считается обратная промывка, исключая образование парафиновых пробок, часто возникающих при прямой промывке.

Электродепарафинизация

Одним из методов депарафинизации является применение устройств, располагаемых в области интенсивного парафинообразования.

Установка создает температуру в интервале спуска до 100 °С. Дальнейшим развитием этого направления явился спуск нагревателей внутрь непосредственно в интервалы парафинообразования, для чего была разработана малогабаритная печь диаметром 29 мм и мощностью 9,45 кВт.

Получение тепла за счет взаимодействия химических реагентов

Создание высокотемпературного теплового поля в зоне отложения АСПО достигают путем закачки взаимодействующих с выделением тепла компонентов. При этом предполагают, что в результате экзотермической реакции в полости обеспечивается создание температуры, превышающей температуру плавления самых тугоплавких составляющих парафиновых отложений. В качестве таких компонентов предлагают использовать водные растворы диэтиламина и соляной кислоты. При смешении этих компонентов протекает экзотермическая химическая реакция с выделением значительного количества тепла.

Физические методы

Создание дополнительных центров кристаллизации. Успешное внедрение в последние годы технологий, используемых для решения острых проблем, связанных с добычей нефти, и основанных на использовании магнитного воздействия на промышленные среды, настоятельно требует рассмотрения механизма действия магнитной обработки и достигаемого эффекта.

Химические методы

Процесс выпадения парафина представляет собой довольно сложное явление и отличается необратимостью процесса. В образовании отложений участвуют кристаллы парафина, образующиеся в потоке нефти и оседающие на стенках оборудования, и кристаллы, возникающие непосредственно на контактирующей с нефтью поверхности. В связи с этим в основе действия механизма предотвращения отложений парафина с помощью реагентов-ингибиторов лежат адсорбционные процессы, происходящие на границе фаз «жидкость – твердое тело».

Методика решения

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 произвести расчет места и времени включения нагревательных элементов.

Задача стабилизации температурного поля, сводиться, к удержанию температурных изменений $T(x,t)$ в пределах $T_{зад}$. Эту функцию будут реализовывать импульсные нагревательные элементы.

$$\frac{\partial T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial \tau} = a_u \cdot \left(\frac{\partial^2 T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r_u} \frac{\partial T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial r} + \frac{1}{r_u^2} \frac{\partial^2 T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial z^2} \right),$$

$$\frac{\partial T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial \tau} = a_u \cdot \left(\frac{\partial^2 T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r_u} \frac{\partial T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial r} + \frac{1}{r_u^2} \frac{\partial^2 T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial z^2} \right) - v \cdot \frac{\partial T(r, \varphi, z, \tau)}{\partial z}.$$

Граничные условия:

$$\lambda_o \cdot \frac{\partial T(r_o, \varphi, z, \tau)}{\partial r} = \lambda_e \cdot \frac{\partial T(r_e, \varphi, z, \tau)}{\partial r},$$

$$\lambda_e \cdot \frac{\partial T(r_e, \varphi, z, \tau)}{\partial r} = \lambda_u \cdot \frac{\partial T(r_u, \varphi, z, \tau)}{\partial r},$$

$$\frac{1}{\mu_o} \cdot \frac{\partial A(r_o, \varphi, z, \tau)}{\partial r} = \frac{1}{\mu_e} \cdot \frac{\partial A(r_e, \varphi, z, \tau)}{\partial r},$$

$$\frac{1}{\mu_e} \cdot \frac{\partial A(r_e, \varphi, z, \tau)}{\partial r} = \frac{1}{\mu_u} \cdot \frac{\partial A(r_u, \varphi, z, \tau)}{\partial r}.$$

Получим дискретные аналоги (с заменой непрерывных координат (r, φ, z) на дискретные (i, j, k)):

$$\Delta T(i, j, k, \tau) = \Delta \tau \cdot a_e \cdot \left[\frac{T(i-1, j, k, \tau) - 2 \cdot T(i, j, k, \tau) + T(i+1, j, k, \tau)}{\Delta r^2} + \frac{T(i, j, k, \tau) - T(i-1, j, k, \tau)}{r_e \cdot \Delta r^2} + \right.$$

$$\left. + \frac{T(i, j-1, k, \tau) - 2 \cdot T(i, j, k, \tau) + T(i, j+1, k, \tau)}{(r_e \cdot \Delta r)^2 \cdot \Delta \varphi^2} + \frac{T(i, j, k-1, \tau) - 2 \cdot T(i, j, k, \tau) + T(i, j, k+1, \tau)}{\Delta z^2} \right]$$

$$\Delta T(i, j, k, \tau) = \Delta \tau \cdot a_u \cdot \left[\frac{T(i-1, j, k, \tau) - 2 \cdot T(i, j, k, \tau) + T(i+1, j, k, \tau)}{\Delta r^2} + \right.$$

$$\left. + \frac{T(i, j, k, \tau) - T(i-1, j, k, \tau)}{r_u \cdot \Delta r^2} + \frac{T(i, j-1, k, \tau) - 2 \cdot T(i, j, k, \tau) + T(i, j+1, k, \tau)}{(r_u \cdot \Delta r)^2 \cdot \Delta \varphi^2} + \right.$$

$$\left. + \frac{T(i, j, k-1, \tau) - 2 \cdot T(i, j, k, \tau) + T(i, j, k+1, \tau)}{\Delta z^2} \right] - v_m \cdot \frac{T(i, j, k, \tau) - T(i, j, k-1, \tau)}{\Delta z}$$

И дискретные аналоги граничных условий:

$$T_{o/e}(i, j, k, t) = \frac{\lambda_o \cdot T_o(i-1, j, k, t) - \lambda_e \cdot T_e(i+1, j, k, t)}{(\lambda_o + \lambda_e)},$$

$$T_{e/u}(i, j, k, t) = \frac{\lambda_e \cdot T_e(i-1, j, k, t) - \lambda_u \cdot T_u(i+1, j, k, t)}{(\lambda_u + \lambda_e)},$$

$$A_{o/e}(i, j, k, t) = \frac{1/\mu_o \cdot A_o(i-1, j, k, t) - 1/\mu_e \cdot A_e(i+1, j, k, t)}{\left(1/\mu_o + 1/\mu_e\right)},$$

$$A_{e/u}(i, j, k, t) = \frac{1/\mu_e \cdot A_e(i-1, j, k, t) - 1/\mu_u \cdot A_u(i+1, j, k, t)}{\left(1/\mu_e + 1/\mu_u\right)}.$$

Тогда передаточная функция замкнутой системы примет как произведение передаточной функции объекта на передаточную функцию распределенного ПИД-регулятора.

$$W_\eta(r, \varphi, z, S) = \frac{k_\eta}{T_\eta \cdot S + 1} \cdot e^{-\tau \cdot S}, \quad (\eta = 1, 3)$$

$$W_{PP}(r, \varphi, z, S) = E_1 \cdot \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] + E_4 \cdot \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{S} + E_2 \cdot \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right] \cdot S,$$

$$W(r, \varphi, z, S) = \sum_{\eta=1,3} \frac{k_\eta}{T_\eta \cdot S + 1} \cdot e^{-\tau \cdot S} \cdot \left[E_1 \cdot \left(\frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right) + E_4 \cdot \left(\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right) \cdot \frac{1}{S} + E_2 \cdot \left(\frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right) \cdot S \right].$$

Дискретный аналог передаточной функции замкнутой системы управления примет следующий вид:

$$W(i, j, k, S) = \sum_{\eta=1,3} \frac{k_\eta}{T_\eta \cdot S + 1} \cdot e^{-\tau \cdot S} \cdot \left[D_1(i, j, k, S) + \frac{D_4(i, j, k, S)}{S} + D_2(i, j, k, S) \cdot S \right],$$

$$D_{1,2,4}(i, j, k, S) = E_{1,2,4} \cdot \left[\frac{n_{1,2,4} - 1}{n_{1,2,4}} \cdot F(i, j, k, S) - \frac{1}{n_{1,2,4}} \left(\frac{F(i-1, j, k, S) - 2 \cdot F(i, j, k, S) + F(i+1, j, k, S)}{\Delta r^2} + \right. \right.$$

$$\left. + \frac{F(i, j, k, S) - F(i-1, j, k, S)}{r \cdot \Delta r^2} + \frac{F(i, j-1, k, S) - 2 \cdot F(i, j, k, S) + F(i, j+1, k, S)}{(r \cdot \Delta r)^2 \cdot \Delta \varphi^2} + \right.$$

$$\left. + \frac{F(i, j, k-1, S) - 2 \cdot F(i, j, k, S) + F(i, j, k+1, S)}{\Delta z^2} \right],$$

где $D_{1,2,4}(i, j, k, S)$ – пропорциональная, интегральная и дифференциальная составляющие распределенного регулятора; $F(r, \varphi, z, S)$ – сигнал поступающий на вход распределенного регулятора. Проверим на устойчивость полученную замкнутую систему правления. Учитывая граничные условия, входное воздействие может быть представлено в виде:

$$U(x, y, \tau) = \sum_{\eta, \gamma=1}^{\infty} C_{\eta, \gamma}(\tau) \cdot \sin(\psi_\eta \cdot x) \cdot \sin(\tilde{\varphi}_\gamma \cdot y),$$

где

$$\psi_\eta = \pi \cdot \frac{\eta}{X_L}; \quad \tilde{\varphi}_\gamma = \pi \cdot \frac{\gamma}{Y_L}.$$

В [4, 5–7] получена передаточная функция объекта по каждой пространственной моде входного воздействия, которая может быть записана в виде

$$W_{0,\eta,y}(s) = \frac{T_{\eta,y}(x, y, z = z^*, s)}{C_{\eta,y}(s) \cdot \sin(\psi_\eta \cdot r) \cdot \sin(\phi_y \cdot \varphi)} = \frac{\exp[\beta_{\eta,y} \cdot z^*] + \exp[-\beta_{\eta,y} \cdot z^*]}{\exp[\beta_{\eta,y} \cdot z_L] + \exp[-\beta_{\eta,y} \cdot z_L]},$$

$$(\eta, y = \overline{1, \infty}),$$

$$\beta = \left(\frac{s}{a} + G_{\eta,\gamma} \right)^{1/2},$$

$$G_{\eta,\gamma} = \psi_\eta^2 + \tilde{\varphi}_\gamma^2,$$

$$(\eta, \gamma = \overline{1, \infty}).$$

Нанося на комплексную плоскость изображения передаточной функции, при изменении частоты получим годограф следующего вида, для 1–6 мод:

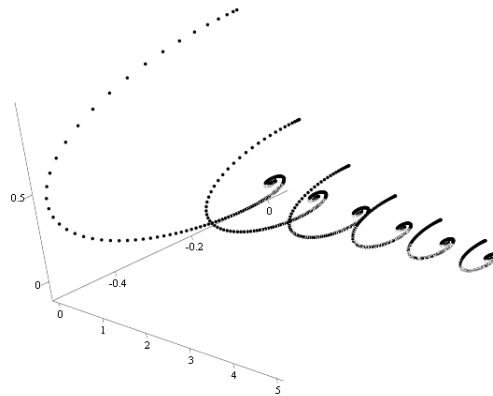


Рис. 1. Полученный годограф

Построим единичную окружность с целью проверки на устойчивость согласно модифицированному критерию Найквиста.

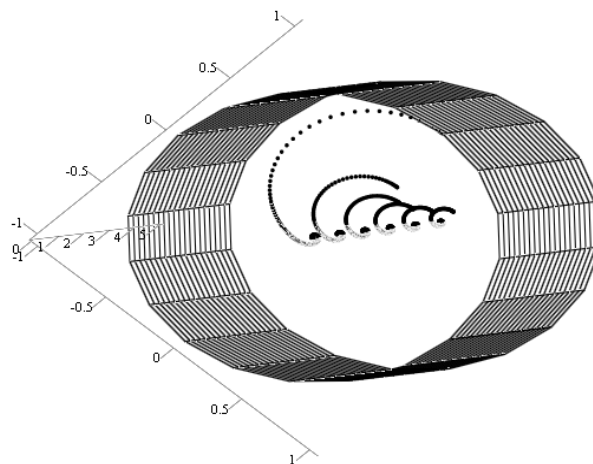


Рис. 2. Проверка на устойчивость разработанной системы управления.

На рисунках демонстрирующие примеры годографов, построенных по передаточной функции синтезируемого регулятора, не охватывают точку с координатами (-1;0) на комплексной плоскости. Таким образом, можно сделать вывод о том, что разрабатываемая система управления будет работать устойчиво.

Техническая реализация предлагаемого метода. В связи с необходимостью бурения в различных условиях разработано два технических устройства.

Первое устройство предназначено для геологоразведочного бурения в условиях Арктики и экстремальных температур. Термобур представляет собой металлическую спираль, сердцевина которой представляет собой водоотводящий канал – трубку в центре бура, в промежутке между трубкой и металлическим кожухом внедрены секционные нагревательные элементы, разделенные металлическими переборками.

По результатам моделирования температурных полей термобура с импульсными секционными нагревателями получен следующий режим работы устройства:

1. На начальном этапе – этапе прогрева и выхода на заданный температурный режим, который составляет от 2 до 6 минут, ее потребляемая мощность увеличилась.

2. В рабочем режиме – режиме поддержания заданной температуры потребляемая мощность резко уменьшилась за счет импульсного характера электропитания, используемого для поддержания средней температуры нагревательного элемента бура.

Второе устройство предназначено для прямой добычи высокопарафинистой нефти и поэтому монтируется на НКТ.

Коронковый термобур с импульсными секционными нагревателями состоит из металлической гильзы с коронкой, сердцевина которой представляет собой водоотводящий канал в центре бура, в промежутке между водоотводящим каналом и металлической гильзой внедрены секционные нагревательные элементы, разделенные металлическими переборками.

В статическом режиме коронковый термобур представляет собой техническое изделие неподключенное к сети электропитания. По этой причине секционные нагреватели не создают температурное поле для разогрева металлической гильзы. Порода не плавится, поэтому через водоотводящий канал пробы для анализа не поступают.

В динамическом режиме процесс бурения будет, выглядит следующим образом. Подается импульсный ток на секционные нагревательные элементы, которые разогревают металлическую гильзу и коронку. Бур расплавляет породу, через которую проходит в процессе бурения. Расплавленная порода поднимается по водоотводящему каналу.

Количество теплоты при таком способе нагрева остается тем же, зато энергетические затраты снижаются в восемь раз. Из-за изменения конструкции бура появляется возможность забора проб через водоотводящий канал. Также данное устройство даст возможность установки его на мобильные буровые платформы, так как отпадает необходимость в постоянном снабжении бура жидкими горючими компонентами, обеспечивающими процесс горения.

Численные результаты применения разработанной методики и устройств. Для объекта исследования возьмём следующие характеристики:

1. Нефть Соболиного месторождения ($\eta = 120 \text{ мПа}\cdot\text{с}$, $\rho = 0,850 \text{ г/см}^3$).

2. Нефть Арчинского месторождения ($\eta = 125 \text{ мПа}\cdot\text{с}$, $\rho = 0,860 \text{ г/см}^3$).

Согласно рис. 3 кристаллизация парафинов наступает при температуре – 2 °С.

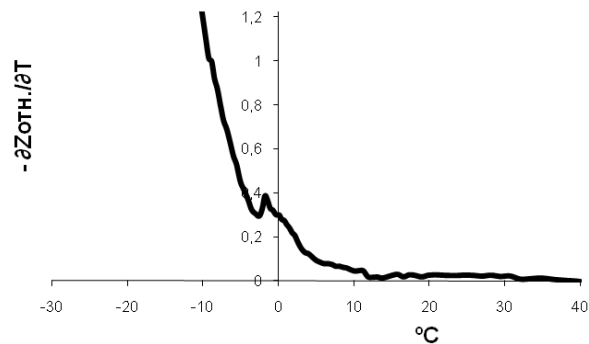
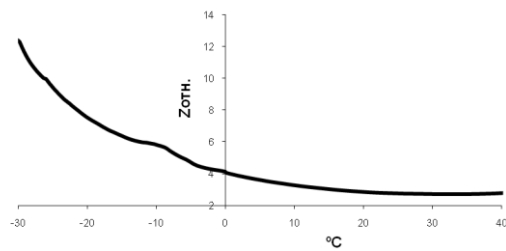
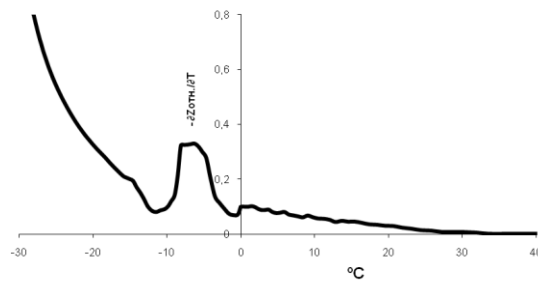


Рис. 3. Зависимость механического сопротивления $-\partial Z_{отн.}/\partial t$ от температуры образца нефти Соболиного месторождения

После добавления включения нагревательных элементов начало кристаллизации парафина смещено в зону низких температур на 7 °С, что подтверждает влияние нагревательных элементов (рис. 4).



а



б

Рис. 4. Зависимость механического сопротивления $Z_{отн.}$ (а) и отношения $-\partial Z_{отн.}/\partial t$ (б) от температуры образца нефти Соболиного месторождения

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. 5 приведены результаты зависимости относительного механического сопротивления от температуры.

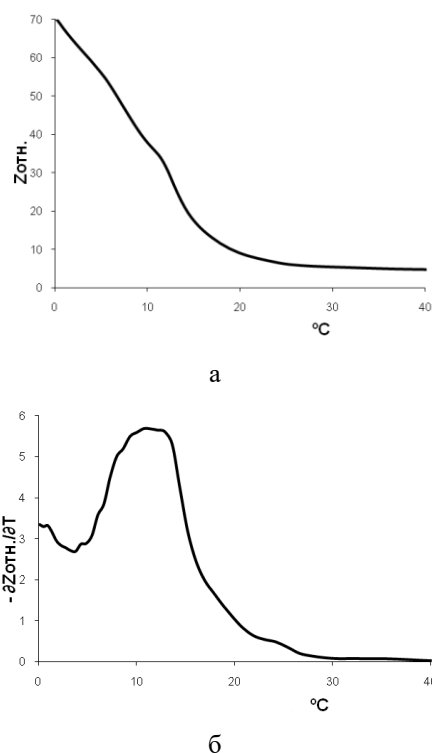


Рис. 5 Зависимость механического сопротивления $Z_{отн.}$ (а) и $-\frac{dZ_{отн.}}{dT}$ (б) от температуры образца нефти Арчинского месторождения

Температура застывания данной нефти наступает при $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, что создает значительные проблемы при перекачке и извлечении из пластов залегания такого типа нефтей.

Начало кристаллизации парафина в нефти Арчинского месторождения изменяется незначительно, на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ холоднее чем у исходного образца. Однако, на рис. 6 б отчетливо виден и второй максимум при $T = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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.

Резкое увеличение $Z_{отн.}$ исходного образца начинается при $T = 19\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{C}$. После введения присадок область интенсивного возрастания $Z_{отн.}$ смещается на $5\text{--}6\text{ }^{\circ}\text{C}$ и практически повторяет форму зависимости, соответствующую исходному образцу см. табл. 1.

Таблица 1

Начало кристаллизации нефтей при добавлении присадок

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

Таким образом разработанные методики показывают реальный технический эффект от внедрения.

Заключение. В работе предложена прикладная теория и методы синтеза распределенных, нелинейных объектов управления на примере процесса добычи высокопарафиновой нефти. Применение данных методов зависит не только от времени, но и от распределенности по пространственной области, занимаемой объектом. В этой связи, принципиально расширяется класс управляющих воздействий, прежде всего за счет возможности включения в их число пространственно-временных управлений, описываемых функциями нескольких переменных – времени и пространственных координат.

Все вышеперечисленные достоинства применения подхода позволяют строить системы регулирования, в которых задачи решаются комплексно с учетом пространственно-временных управлений, происходящих в рассматриваемом объекте. Эффективность регулирования обеспечивается динамическими характеристиками и реакцией системы на внешние возмущения.

Основными результатами работы являются:

1. Предложена процедура стабилизации температурного поля. Данная методика заключается в реакции системы управления на отклоняющееся значение температурного поля, вызванного импульсным источником с релейным принципом управления. В связи с синтезом системы с распределенными параметрами, синтез системы управления отличается от линейного пространственной привязанностью к объекту управления, пространственной распределенностью входных воздействий и учетом пространственного взаимодействия температурных полей [1–11].

2. На предложенные технические решения проходит процедура патентования. В рамках работы получено 22 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, и ТИМ [5–15].

3. Разработан программный комплекс, позволяющий моделировать поведение теплового поля в нефтепроводе [8–20].

Представленные в данной работе исследования, являются завершающим этапом разработки системы управления температурным полем процесса добычи высокопарафиновой нефти.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ильюшин Ю.В., Чернышев А.Б.* Устойчивость распределенных систем с дискретными управляющими воздействиями // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 12 (113). – С. 166-171.
2. *Ильюшин Ю.В., Чернышев А.Б.* Определение шага дискретизации для расчета теплового поля трехмерного объекта управления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 6 (119). – С. 192-200.
3. *Ильюшин Ю.В.* Методика расчета оптимального количества нагревательных элементов в зависимости от значений температурного поля изотропного стержня // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. Т. 2. – 2011. – № 6-2 (138). – С. 48-53.
4. *Ильюшин Ю.В.* Стабилизация температурного поля туннельных печей конвейерного типа // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2011. – № 3 (126). – С. 67-72.
5. *Чернышев А.Б.* Модифицированный критерий абсолютной устойчивости нелинейных распределенных систем управления // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Технические науки. – 2009. – № 3 (151) – С. 38-41.
6. *Ilyushin Y.V., Pershin I. M., Pervukhin D.A., Afanaseva O.V.* Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. A synthesis of distributed management systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Power supply of mining companies. Vol. 87.

7. *Ilyushin Y.V., Pershin I. M., Pervukhin D.A., Afanaseva O.V.* Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. Selection of optimal number of extracting wells // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Power supply of mining companies. Vol. 87.
8. *Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И.* Системы передачи и обработки распределенной информации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 5 (166). – С. 198-211.
9. *Малков А.В., Першин И.М., Помеляйко И.С.* Математическая модель кислородного месторождения углекислых минеральных вод // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7 (168). – С. 116-125.
10. *Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И.* Аппроксимационные модели передаточных функций распределенных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7 (168). – С. 126-138.
11. *Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И.* Синтез распределенных систем управления гидролитосферными процессами месторождений минеральных вод // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 8 (157). – С. 123-137.
12. *Kolesnikov A., Zarembo Ya., Puchkov L., & Zarembo V.* Zinc Electrochemical Reduction on a Steel Cathode in a Weak Electromagnetic Field // Russian Journal of Physical Chemistry A. – 2007. – Vol. 8 (10). – P. 1715-1717. Retrieved January 22, 2014, from <http://dx.doi.org/10.1134/s0036024407100330>.
13. *Pershin I.* Analysis and synthesis of systems with distributed parameters. – Pyatigorsk: RIA-KMV, 2007.
14. *Pleshivtseva Y., & Rapoport E.* The Successive Parameterization Method of Control Actions in Boundary Value Optimal Control Problems for Distributed Parameter Systems // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2009. – Vol. 48 (3). – P. 351-362. Retrieved January 22, 2014, from <http://dx.doi.org/10.1134/S1064230709030034>.
15. *Rapoport E.* Alternance Properties of Optimal Solutions and Computational Algorithms in Problems of Semi-Infinite Optimization of Controlled Systems // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 1996. – Vol. 35 (4). – P. 581-591.
16. *Rapoport E.* Structural Parametric Synthesis of Automatic Control Systems with Distributed Parameters // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2006. – Vol. 45 (4). – P. 553-566. Retrieved January 22, 2014, from <http://dx.doi.org/10.1134/S1064230706040071>.
17. *Rapoport E., & Pleshivtseva Y.* Combined Optimization of Metal Hot Forming Line with Induction Pre-Heating // IEEE 26th Convention of Electrical and Electronics Engineers, Israel, Eilat. – 2010.
18. *Rapoport E., & Pleshivtseva Yu.* Models and Methods of Semi-Infinite Optimization Inverse Heat-Conduction Problems // Heat Transfer Research. – 2006. – Vol. 37 (3). – P. 221-231.
19. *Tikhonov A., & Samarsky A.* Equations of mathematical physics. – Moscow: Science, 1965.
20. *Zarembo V., & Kolesnikov A.* Background Resonant Acoustic Control of Heterophase Processes // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2006. – Vol. 40 (5). – P. 483-495. Retrieved January 22, 2014, from <http://dx.doi.org/10.1134/s0040579506050058>.

REFERENCES

1. *Ilyushin Yu.V., Chernyshev A.B.* Ustoychivost' raspredelennykh sistem s diskretnymi upravlyayushchimi vozdeystviyami [Stability of distributed systems with discrete control actions], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 12 (113), pp. 166-171.
2. *Ilyushin Yu.V., Chernyshev A.B.* Opredelenie shaga diskretizatsii dlya rascheta teplovogo polya trekhmernogo ob"ekta upravleniya [Determining the discretization step for calculating the thermal field of a three-dimensional control object], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 6 (119), pp. 192-200.
3. *Ilyushin Yu.V.* Metodika rascheta optimal'nogo kolichestva nagrevatel'nykh elementov v zavisimosti ot znacheniy temperatur'nogo polya izotropnogo sterzhnya [Method of calculating the optimal number of heating elements depending on the values of the temperature field of an isotropic rod], *Nauchno tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Ser. Informatika. Telekomunikatsii. Upravlenie* [Scientific technical statements SPbGPU. Ser. Computer science. Telecommunications. Control. Vol. 2], 2011, No. 6-2 (138), pp. 48-53.

4. *Ilyushin Yu.V.* Stabilizatsiya temperaturnogo polya tunnel'nykh pechey konveyernogo tipa [Stabilization of the temperature field of conveyor-type tunnel furnaces], *Nauchno tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Ser. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [Scientific technical statements SPbGPU. Ser. Computer science. Telecommunications. Control], 2011, No. 3 (126), pp. 67-72.
5. *Chernyshev A.B.* Modifitsirovannyy kriteriy absolyutnoy ustoychivosti nelineynykh raspredelennykh sistem upravleniya [Modified criterion of absolute stability of nonlinear distributed control systems], *Izvestiya vuzov. Sev.-Kavk. region. Tekhnicheskie nauki* [University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series], 2009, No. 3 (151), pp. 38-41.
6. *Ilyushin Y.V., Pershin I. M., Pervukhin D.A., Afanaseva O.V.* Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. A synthesis of distributed management systems, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Power supply of mining companies*, Vol. 87.
7. *Ilyushin Y.V., Pershin I. M., Pervukhin D.A., Afanaseva O.V.* Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. Selection of optimal number of extracting wells, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Power supply of mining companies*, Vol. 87.
8. *Pershin I.M., Veselov G.E., Pershin M.I.* Sistemy peredachi i obrabotki raspredelennoy informatsii [Systems for the transmission and processing of distributed information], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 5 (166), pp. 198-211.
9. *Malkov A.V., Pershin I.M., Pomelyayko I.S.* Matematicheskaya model' kislovodskogo mestorozhdeniya uglekislykh mineral'nykh vod [Mathematical model of the Kislovodsk carbonate mineral water field], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 7 (168), pp. 116-125.
10. *Pershin I.M., Veselov G.E., Pershin M.I.* Approksimatsionnye modeli peredatochnykh funktsiy raspredelennykh ob"ektov [Approximation models of transfer functions of distributed objects], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 7 (168), pp. 126-138.
11. *Pershin I.M., Veselov G.E., Pershin M.I.* Sintez raspredelennykh sistem upravleniya gidrolitosfernymi protsessami mestorozhdeniy mineral'nykh vod [Synthesis of distributed control systems for hydrolithospheric processes of mineral water deposits], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 8 (157), pp. 123-137.
12. *Kolesnikov A., Zaremba Ya., Puchkov L., & Zaremba V.* Zinc Electrochemical Reduction on a Steel Cathode in a Weak Electromagnetic Field, *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2007, Vol. 8 (10), pp. 1715-1717. Retrieved January 22, 2014, from <http://dx.doi.org/10.1134/s0036024407100330>.
13. *Pershin I.* Analysis and synthesis of systems with distributed parameters. Pyatigorsk: RIA-KMV, 2007.
14. *Pleshivtseva Y., & Rapoport E.* The Successive Parameterization Method of Control Actions in Boundary Value Optimal Control Problems for Distributed Parameter Systems, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2009, Vol. 48 (3), pp. 351-362. Retrieved January 22, 2014, from <http://dx.doi.org/10.1134/S1064230709030034>.
15. *Rapoport E.* Alternance Properties of Optimal Solutions and Computational Algorithms in Problems of Semi-Infinite Optimization of Controlled Systems, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 1996, Vol. 35 (4), pp. 581-591.
16. *Rapoport E.* Structural Parametric Synthesis of Automatic Control Systems with Distributed Parameters, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2006, Vol. 45 (4), pp. 553-566. Retrieved January 22, 2014, from <http://dx.doi.org/10.1134/S1064230706040071>.
17. *Rapoport E., & Pleshivtseva Y.* Combined Optimization of Metal Hot Forming Line with Induction Pre-Heating, *IEEE 26th Convention of Electrical and Electronics Engineers, Israel, Eilat, 2010*.
18. *Rapoport E., & Pleshivtseva Yu.* Models and Methods of Semi-Infinite Optimization Inverse Heat-Conduction Problems, *Heat Transfer Research*, 2006, Vol. 37 (3), pp. 221-231.
19. *Tikhonov A., & Samarsky A.* Equations of mathematical physics. Moscow: Science, 1965.
20. *Zaremba V., & Kolesnikov A.* Background Resonant Acoustic Control of Heterophase Processes, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2006, Vol. 40 (5), pp. 483-495. Retrieved January 22, 2014, from <http://dx.doi.org/10.1134/s0040579506050058>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.Б. Чернышев.

Ильюшин Юрий Валерьевич – Санкт-Петербургский горный университет; e-mail: Ilyushin_YuV@pers.spmi.ru; 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2; тел.: 89111783523; кафедра системного анализа и управления; доцент.

Ilyushin Yury Valerievich – St. Petersburg Mining University; e-mail: Ilyushin_YuV@pers.spmi.ru; 199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2; phone: +79111783523; the department of system analysis and control; associate professor.

УДК 681.5

DOI 10.23683/2311-3103-2018-5-186-198

Ю.В. Ильюшин, И.М. Першин**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО
РАСПРЕДЕЛЕННОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ С ИМПУЛЬСНЫМ
ВХОДНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ**

Появление и развитие теории систем с распределенными параметрами (СРП) обусловлено сложностью и нестандартностью методов исследования, анализа и синтеза. Таким образом, задачи теории систем с распределенными параметрами являются значительно более сложными, чем сосредоточенными. Это связано с необходимостью пространственно-распределенного анализа текущего состояния объекта управления, в том числе переменного во времени, которое в свою очередь, расширяется класс возможных воздействий на объект управления (например, пространственно-временных управлений). Для анализа таких систем применение теории систем с распределенными параметрами становится неприемлемой. Особенностью исследования систем с распределенными параметрами является разработка математического аппарата и методик их исследования. Стоит отметить, что среди нелинейных систем, есть класс систем с одним нелинейным элементом, для которых применим разработанный аппарат с небольшими изменениями. Например, импульсные системы с распределенными параметрами. В таких системах один представленный в виде группы элементов может образовать многомерную, многоуровневую систему. Тогда основной задачей синтеза таких систем становится поиск возможных решений, исходя из поиска возможных состояний системы, обеспечивающих устойчивую работоспособность системы. Таких возможных решений бывает огромное количество, в зависимости от различных начальных и граничных условий, вида реакции на отклонения от заданного режима и т.д. Характеристика нелинейных звеньев описывается с указанием логических условий. В связи с нелинейной характеристикой, выходная переменная не будет пропорциональна входной переменной. Исходя из этого реакция замкнутой системы, например, на импульсный сигнал будет зависеть от мощности данного сигнала. В случае анализа динамических колебательных систем, то обратить внимание на затухание переходного процесса, которое появляется из-за изменения периода колебаний. Таким образом, из-за отсутствия единого метода решения нелинейных распределенных систем необходимо осуществлять синтез частного метода решения задачи. В статье построена математическая модель пространственно двухмерного объекта управления. Построена передаточная функция многомерной системы. Предложена методика определения устойчивости пространственно распределенного объекта управления с импульсным входным воздействием. Проведен анализ полученных результатов. Сделан вывод об обобщении результатов исследования на класс систем с распределенными параметрами входным воздействием которых является импульсный сигнал.

Распределенные системы; тепловое поле; импульсное входное воздействие.