

УДК. 681.308

**ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В
МАГИСТРАЛЬНОМ НЕФТЕПРОДУКТОПРОВОДЕ ОБОРУДОВАННОМ
ЦЕНТРОБЕЖНЫМ НАСОСНЫМ АГРЕГАТОМ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ
ПЕРЕКАЧКЕ РАЗНОСОРТНЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ**

ПАШАЕВ А.М., ЭФЕНДИЕВ О.З., МАМЕДОВ А.И., АЗИЗОВ Р.Р.

Национальная Академия Авиации

На базе развития теории динамики магистральных трубопроводов представлен новый, простой универсальный численный метод расчета динамических процессов в магистральном нефтепродуктопроводе, оборудованном центробежным насосным агрегатом при последовательной перекачке двух разнородных нефтепродуктов. Получены новые простые рекуррентные соотношения, легко реализуемые на компьютере.

В настоящее время последовательная перекачка различных по физико-химическим свойствам (плотность, вязкость) нефтепродуктов по трубопроводу приобретает все большее практическое значение. Данные нефтепродуктообеспечения показывают, что режим работы магистральных нефтепродуктопроводов в процессе эксплуатации, в основном, является переменным [1-9, 15-17].

Неустановившиеся течения нефтепродуктов в магистральных нефтепродуктопроводах вызывается рядом причин, к числу которых относятся нарушения ритмичности при приеме нефтепродуктов от нефтеперерабатывающих заводов, пуск и установка одного или нескольких насосных агрегатов на нефтепродуктоперекачивающих насосных станциях, внезапное открытие и закрытие задвижек, включение и отключение путевых сбросов и подкачек нефтепродуктов по трассе трубопровода, изменение места положения границы раздела по мере продвижения партий нефтепродуктов, срабатывания автоматической системы защиты от перегрузок по давлению.

Это может вызвать резкие и часто опасные колебания давления и расхода перекачиваемого нефтепродукта, создающего в магистральном нефтепродуктопроводе аварийные ситуации – нарушение герметичности нефтепродуктопровода, разрушение технологического оборудования.

Умение рассчитать динамические режимы в магистральных нефтепродуктопроводах необходимо как при проектировании (расстановка насосных станций; определение диаметра и места подключения отводов; выбор системы защиты трубопровода от гидравлических ударов; обоснование быстродействия средств защиты по минимальным и максимальным давлениям и системы автоматического регулирования), так и при эксплуатации (моделирование различных технологических ситуаций для прогностического определения реакции системы на управляющие воздействия, имитация ее поведения в аварийных режимах, определение влияния нестационарности режимов на выполнение оперативных планов поставки нефтепродуктов попутным потребителям) [1, 6, 11, 15- 17].

Вопросы динамики при последовательной перекачке разнородных нефтепродуктов по трубопроводу в научной литературе освящены еще не достаточно.

В то же время, опыт эксплуатации магистральных нефтепродуктопроводов показывает, что в процессе последовательной перекачки разнородных нефтепродуктов

особенно часто приходится сталкиваться с различными предаварийными и аварийными ситуациями, нарушающими ритмичность работы трубопроводов [1-9, 15-17].

Это объясняется тем, что в процессе последовательной перекачки разнородных нефтепродуктов возникающие нестационарные процессы имеют свои особенности [1-9, 15-17].

В случае нестационарного движения разнородных нефтепродуктов характер изменения параметров, при прочих равных условиях, зависит не только от свойств обеих жидкостей (плотности, вязкости), но и от порядка их следования и местонахождения наблюдаемого сечения относительно источника возмущения-границы раздела нефтепродуктопроводов [1-9, 15-17].

Не учет этих факторов вызывает целый ряд трудностей при проектировании, эксплуатации и автоматизации магистральных нефтепродуктопроводов.

В условиях широкого внедрения компьютерной техники в практику инженерных расчетов в настоящее время становится особенно эффективным применение численных методов расчета динамических режимов в магистральных нефтепродуктопроводах, отличающихся простотой и универсальностью решения широкого класса задач [1-9, 15-17].

Использование компьютерной техники обосновывается тем, что осуществление реальных экспериментов в магистральных нефтепродуктопроводах часто становится весьма затруднительным, а физическое моделирование требует существенных материальных затрат.

Преимуществом численных методов перед аналитическими является то, что они успешно могут быть применены для решения широкого класса задач динамики в сложных нефтепродуктопроводных системах с учетом распределенности параметров, разветвленности участков, а также реальных характеристик отдельных элементов (насосных агрегатов, задвижек).

Одним из специализированных численных методов расчета динамических процессов в магистральных нефтепродуктопроводах при последовательной перекачке разнородных нефтепродуктов, является численный метод, основанный на теории импульсных систем [5-9]. При этом в качестве математического аппарата используется дискретное преобразование Лапласа [10].

Общим недостатком указанного метода [5-9] является, во-первых, то, что применение импульсных систем [10] приводит к необходимости получения передаточных функций эквивалентных дискретных систем, что значительно усложняет ход расчетов. Во-вторых, при таком подходе, т.е. при замене исходной непрерывной системы с распределенными параметрами эквивалентной ей импульсной системой, операция непрерывного интегрирования может быть заменена суммированием, пользуясь лишь формулой прямоугольников, лишив ее возможностей использования других формул-трапеций, Симпсона.

Как показывает проведенный анализ, подобный подход, в ряде случаев, в частности, при резких изменениях параметров магистральных трубопроводов, приводит к значительным погрешностям ввиду того, что применяемые формулы прямоугольников при замене операций непрерывного интегрирования суммированием не позволяют охватить пиковую амплитуду переходного процесса, которые приводят в решении нашей задачи к недопустимым погрешностям.

Одним из эффективных численных методов расчета переходных процессов в объектах с распределенными параметрами, описываемым уравнениями в частных производных гиперболического типа, является численный метод, основанный на использовании дискретного аналога интегрального уравнения свертки [11-17].

Преимуществом указанного метода является то, что он позволяет найти динамические процессы, возникающие в объектах с распределенными параметрами, без перехода в область дискретных изображений, а также осуществлять переход от

Лапласовых изображений искомым функций в область оригиналов без нахождения корней характеристического уравнения, без разложения операторного коэффициента распространения волны и операторного волнового сопротивления в ряды, что значительно упрощает математические выкладки и повышает точность расчетов. Кроме того, предложенный новый подход [11-17], в отличие от существующих методов [1-9], в зависимости от заданной точности расчета, позволяет заменить операцию непрерывного интегрирования суммированием, пользуясь формулами не только прямоугольников, но и трапеции Симпсона.

Указанные свойства подхода [11-17] существенно расширяют круг решаемых практических задач.

Следует отметить, что магистральные нефтепродуктопроводы при последовательной перекачке разнородных нефтепродуктов, относятся к классу неоднородных систем с распределенными параметрами, состоящей из разных однородных сред, т.е. кусочно-однородной среды [1-9, 15-17].

При этом, в отличие от однородных систем с распределенными параметрами, особенностью волновых процессов, протекающих в кусочно-однородной системе с распределенными параметрами, является, то, что волна, движущаяся из одной среды в другую среду, изменяет свою амплитуду (“преломляется” и только частично “отражается” от место сопряжения разных сред), т.е. нарушается однородность протекания волновых явлений.

Указанное обстоятельство резко усложняет решение вопроса математического моделирования динамических процессов, возникающих в кусочно-однородных системах с распределенными параметрами.

Таким образом, для решения проблемы динамики в кусочно-однородной системе с распределенными параметрами каждая среда описывается с помощью дифференциальных уравнений в частных производных и, поэтому, кроме начальных и граничных условий, здесь требуется задание дополнительного условия- условия сопряжения однородных сред. Отметим, что в подобной постановке задачи значения искомым функций в точке сопряжения неоднородных сред в начале решения являются неизвестными. Их значения определяются по ходу решения задачи.

В данной статье, впервые в научной литературе, рассматриваются вопросы, связанные с дальнейшим развитием и обобщением работ [11-17] для разработки численного метода моделирования динамических процессов в магистральном нефтепродуктопроводе, оборудованном центробежным насосным агрегатом, при последовательной перекачке двух разнородных нефтепродуктов, рассматриваемых как кусочно- однородные системы с распределенными параметрами, при замене операции непрерывного интегрирования суммированием, пользуясь формулой трапеции.

1. Постановка задачи. Для решения поставленной задачи предлагается следующая простейшая динамическая модель описания переходных процессов при последовательной перекачке двух разнородных нефтепродуктов. Предполагается, что по трубопроводу последовательно движутся два нефтепродукта с плоской границей раздела (так как длина области, занимаемой смесью, не превышает 1% от всей длины трубопровода), отличающиеся плотностью, вязкостью и упругостью [1-9, 15-17].

За время переходного процесса граница раздела нефтепродуктов считается неподвижной [1-9, 15-17]. Это связано с тем, что возникающие при последовательной перекачке переходные процессы, обычно, обладают малой продолжительностью, и плоскость контакта двух сред успевает переместиться на незначительно малое, по сравнению с длиной трубопровода, расстояние [1-9, 15-17].

При этом длину участка, заполненного первым нефтепродуктом, назовем участком l_1 , длину участка, заполненного вторым нефтепродуктом – участком l_2 .

Движение каждого нефтепродукта описывается линейризованными уравнениями И.А.Чарного [1-9, 15-17].

Таким образом, переходные процессы, протекающие в магистральном нефтепродуктопроводе при последовательной перекачке двух разноразных нефтепродуктов, описываются телеграфными уравнениями:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial H_i}{\partial x} &= k_1^i \frac{\partial Q_i}{\partial t} + k_3^i Q_i, \\ -\frac{\partial Q_i}{\partial x} &= k_2^i \frac{\partial H_i}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{при } i=1, \quad 0 \leq x \leq L_1$$

$$i=2, \quad L_1 \leq x \leq L_2$$

где $i=1,2$; $L_1 = l_1$, $L_2 = \sum_{i=1}^2 l_i$, $H_i = H_i(x,t)$ $Q_i = Q_i(x,t)$ – соответственно изменение напора

и расхода на i -м участке; l_i – длина i -го участка; $k_1^i = \frac{1}{gF_i}$, $k_2^i = \frac{gF_i}{c_i^2}$, $k_3^i = \frac{\eta_i \omega_i}{2D_i}$; F_i

поперечное сечение i -го участка; g – ускорение силы тяжести; η_i – коэффициент гидравлического сопротивления в формуле Дарси-Вейсбаха для потери напора на трение на i -м участке; ω_{cp} – средняя по сечению скорость движения нефтепродукта в стационарном режиме; D_i – внутренний диаметр i -го участка; c_i – скорость звука на i -м участке.

Допустим, что напор в нефтепродуктопроводе до включения насосного агрегата был постоянным и равен H_0 . Требуется найти переходные процессы в данной системе при пуске насосного агрегата на открытую напорную задвижку (рис 1).

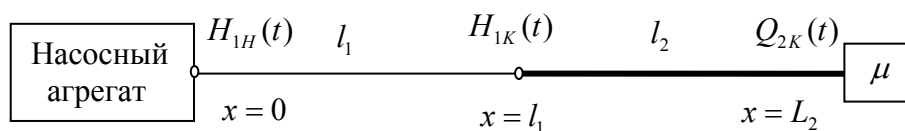


Рис 1.

По условию задачи начальные условия имеют вид:

$$H_i(x,t)_{t=0} = H_0, \quad Q_i(x,t)_{t=0} = 0$$

Граничные условия имеют следующий вид:

$$H_1(x,t)_{x=0} = H_{1H}(t), \quad H(x,t)_{x=l_1} = H_{1K}(t)$$

$$H_2(x, t)_{x=l_1} = H_{2H}(t) \quad H_2(x, t)_{x=L_2} = \mu Q_2(x, t)_{x=L_2}$$

где μ -- постоянный коэффициент.

В частном случае, если конец нефтепродуктопровода закрыт, то $\mu = \infty$, так как $Q_2(L_2, t) = 0$. Если конец нефтепродуктопровода открыт, то $\mu = 0$, так как напор $H_2(L_2, t) = 0$

При этом условие сопряжения в точке $x = l_1$ - на границе раздела нефтепродуктов, запишется в виде:

$$H_1(l_1, t) = H_2(l_1, t),$$

$$Q_1(l_1, t) = Q_2(l_1, t)$$

Решение рассматриваемой задачи позволяет определить степень влияния разнородности последовательно перекачиваемых разнородных нефтепродуктов на характер изменения напора и расхода в любом сечении нефтепродуктопровода при пуске насосного агрегата на заданный режим.

2. Решение задачи. Согласно предложенному подходу, при решении поставленной задачи на первом этапе необходимо получить Лапласово изображение для функций $H_i(x, t)$, $Q_i(x, t)$ в операторной форме.

В связи с этим, при указанных начальных и граничных условиях, из решения системы уравнений (1) получаем выражения для указанных функций в операторной форме:

$$H_1(x, s) = \frac{sh\gamma_1(l_1 - x)}{sh\gamma_1 l_1} \left[H_{1H}(s) - \frac{H_0}{s} \right] + \frac{sh\gamma_1 x}{sh\gamma_1 l_1} \left(H_{1K}(s) - \frac{H_0}{s} \right) + \frac{H_0}{s}, \quad (2)$$

$$Q_1(x, s) = \frac{1}{b_1(s)} \frac{ch\gamma_1(l_1 - x)}{sh\gamma_1 l_1} \left[H_{1H}(s) - \frac{H_0}{s} \right] - \frac{1}{b_1(s)} \frac{ch\gamma_1 x}{ch\gamma_1 l_1} \left(H_{1K}(s) - \frac{H_0}{s} \right), \quad (3)$$

$$H_2(x, s) = \frac{ch\gamma_2(L_2 - x)}{ch\gamma_2 l_2} \left(H_{2H}(s) - \frac{H_0}{s} \right) - b_2(s) Q_{2K}(s) \frac{sh\gamma_2(x - l_1)}{ch\gamma_2 l_2} + \frac{H_0}{s}, \quad (4)$$

$$Q_2(x, s) = \frac{1}{b_2(s)} \frac{sh\gamma_2(L_2 - x)}{ch\gamma_2 l_2} \left(H_{2H}(s) - \frac{H_0}{s} \right) + \frac{ch\gamma_2(x - l_1)}{ch\gamma_2 l_2} Q_{2K}(s), \quad (5)$$

где $\gamma_i(s) = \sqrt{(sk_1^i + k_3^i)sk_2^i}$ - операторная постоянная распространения волны для i -го участка; $b_i(s) = \sqrt{\frac{sk_1^i + k_3^i}{sk_2^i}}$ - операторное волновое сопротивление для i -го участка; s - оператор преобразования Лапласа; $H_i(x, s)$, $Q_i(x, s)$, $H_{1H}(s)$, $H_{1K}(s)$, $H_{2H}(s)$, $Q_{2K}(s)$ - Лапласово изображение функций $H_i(x, t)$, $Q_i(x, t)$, $H_{1H}(t)$, $H_{1K}(t)$, $H_{2H}(t)$, $Q_{2K}(t)$

Второй этап решения данной задачи связан с осуществлением перехода от изображений (2)-(5) в область оригиналов.

В связи с этим, согласно новому подходу, предложенному в [15-17], в выражениях для функций $H_i(x, s)$, $Q_i(x, s)$ из (2)-(5), переходя от гиперболических функций к степенным функциям в системе относительных единиц, получим:

$$h_1(\delta_1, s) \left[\frac{1}{s} - k_1^1(s) \right] = [k_2^1(s) - k_3^1(s)] \left(h_{1H}(s) - \frac{h_0}{s} \right) + [k_4^1(s) - k_5^1(s)] \left(h_{1K}(s) - \frac{h_0}{s} \right) + \frac{h_0}{s} \left(\frac{1}{s} - k_1^1(s) \right), \quad (6)$$

$$q_1(\delta_1, s) \left[\frac{1}{s} - k_1^1(s) \right] = [k_6^1(s) + k_7^1(s)] \left(h_{1H}(s) - \frac{h_0}{s} \right) - [k_8^1(s) + k_9^1(s)] \left(h_{1K}(s) - \frac{h_0}{s} \right),$$

$$(7) \quad h_2(\delta_2, s) [k_6^2(s) + k_7^2(s)] = [k_2^2(s) + k_3^2(s)] \left(h_{2H}(s) - \frac{h_0}{s} \right) - \frac{1}{k_2} [k_4^2(s) - k_5^2(s)] q_{2K}(s) + \frac{h_0}{s} [k_6^2(s) + k_7^2(s)]$$

(8)

$$q_2(\delta_2, s) [1 + k_1^2(s)] = k_2 [k_2^2(s) - k_3^2(s)] \left(h_{2H}(s) - \frac{h_0}{s} \right) + [k_4^2(s) + k_5^2(s)] q_{2K}(s),$$

(9)

где

$$k_1^1(s) = \frac{e^{-2\gamma_1 l_1}}{s}, \quad k_2^1(s) = \frac{e^{-2\gamma_1 l_1 \delta_1}}{s},$$

$$k_3^1(s) = \frac{e^{-2\gamma_1 l_1 (1-\delta_1)}}{s}, \quad k_4^1(s) = \frac{e^{-\gamma_1 l_1 (1-2\delta_1)}}{s}, \quad k_5^1(s) = \frac{e^{-\gamma_1 l_1 (1+2\delta_1)}}{s}, \quad k_6^1(s) = \frac{1}{\sqrt{s(s+2a_1)}} e^{-2\gamma_1 l_1 \delta_1}$$

$$k_7^1(s) = \frac{1}{\sqrt{s(s+2a_1)}} e^{-2\gamma_1 l_1 (1-\delta_1)}, \quad k_8^1(s) = \frac{1}{\sqrt{s(s+2a_1)}} e^{-\gamma_1 l_1 (1-2\delta_1)},$$

$$k_9^1(s) = \frac{1}{\sqrt{s(s+2a_1)}} e^{-\gamma_1 l_1 (1+2\delta_1)},$$

$$k_1^2(s) = \frac{e^{-2\gamma_2 l_2}}{s}, \quad k_2^2(s) = \frac{1}{\sqrt{s(s+2a_2)}} e^{-\gamma_2 l_2 \delta_2^1}, \quad k_3^2(s) = \frac{1}{\sqrt{s(s+2a_2)}} e^{-\gamma_2 l_2 \delta_2^2},$$

$$k_4^2(s) = \frac{1}{s} e^{-2\gamma_2 l_2 \delta_2^3}, \quad k_5^2(s) = \frac{1}{s} e^{-2\gamma_2 l_2 \delta_2^4}, \quad k_6^2(s) = \frac{1}{\sqrt{s(s+2a_2)}}, \quad k_7^2(s) = \frac{1}{\sqrt{s(s+2a_2)}} e^{-2\gamma_2 l_2}$$

$$\delta_i = \frac{x_i}{2l_i}, \quad \delta_2^1 = 1 - L_2' + \bar{\delta}_2, \quad \delta_2^2 = 1 + L_2' - \bar{\delta}_2,$$

$$\delta_2^3 = 1 + L_2'' - \bar{\delta}_2,$$

$$\delta_2^4 = 1 - L_2'' + \bar{\delta}_2,$$

$$\bar{\delta}_2 = \frac{x}{l_2}, \quad L_2' = \frac{L_2}{l_2}, \quad L_2'' = \frac{l_1}{l_2},$$

$$h_i(\delta_i, s) = \frac{H_i(\delta_i, s)}{H_{ном1}}, \quad q_i(\delta_i, s) = \frac{Q_i(\delta_i, s)}{Q_{ном1}},$$

$$Q_{ном1} = \frac{H_{ном1}}{b_1}, \quad H_{ном1}, Q_{ном1} \text{ -- номинальный напор и расход на 1-м участке;}$$

$$k_2 = \frac{b_1}{b_2} \text{ -- постоянный коэффициент; } b_i = \frac{c_i}{F_i}, \quad h_0 = \frac{H_0}{H_{ном1}}$$

На основе теоремы свертки [15-17], переходя от уравнений (6)-(9) относительно изображений к уравнениям относительно оригиналов, получим:

$$\begin{aligned} & \int_0^t h_1(t-\theta, \delta_1) l(\theta) d\theta - \int_{\frac{2l_1}{c_1}}^t h_1(t-\theta, \delta_1) k_1^1(\theta) d\theta = \int_{\frac{2l_1 \delta_1}{c_1}}^t (h_{1H}(t-\theta) - h_0) k_2^1(\theta) d\theta - \\ & + \int_{\frac{2l_1(1-\delta_1)}{c_1}}^t (h_{1H}(t-\theta) - h_0) k_3^1(\theta) d\theta + \int_{\frac{l_1(1-2\delta_1)}{c_1}}^t (h_{1K}(t-\theta) - h_0) k_4^1(\theta) d\theta - \int_{\frac{l_1(1+2\delta_1)}{c_1}}^t (h_{1K}(t-\theta) - h_0) k_5^1(\theta) d\theta + \\ & + h_0 \int_0^t l(\theta) l(t-\theta) d\theta - h_0 \int_{\frac{2l_1}{c_1}}^t k_1^1(\theta) l(t-\theta) d\theta \end{aligned}$$

(10)

$$\begin{aligned} & \int_0^t q_1(t-\theta, \delta_1) l(\theta) d\theta - \int_{\frac{2l_1}{c_1}}^t q_1(t-\theta, \delta_1) k_1^1(\theta) d\theta = \int_{\frac{2\delta_1 l_1}{c_1}}^t (h_{1H}(t-\theta) - h_0) k_6^1(\theta) d\theta + \\ & + \int_{\frac{2l_1(1-\delta_1)}{c_1}}^t (h_{1H}(t-\theta) - h_0) k_7^1(\theta) d\theta - \int_{\frac{l_1(1-2\delta_1)}{c_1}}^t (h_{1K}(t-\theta) - h_0) k_8^1(\theta) d\theta - \int_{\frac{l_1(1+2\delta_1)}{c_1}}^t (h_{1K}(t-\theta) - h_0) k_9^1(\theta) d\theta \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \int_0^t h_2(t-\theta, \delta_2) k_6^2(\theta) d\theta + \int_{\frac{2l_2}{c_2}}^t h_2(t-\theta, \delta_2) k_7^2(\theta) d\theta = \int_{\frac{\delta_2^1 l_2}{c_2}}^t (h_{2H}(t-\theta) - h_0) k_2^2(\theta) d\theta + \\ & + h_0 \int_{\frac{\delta_2^1 l_2}{c_2}}^t l(\theta) k_6^2(\theta) (t-\theta) d\theta + \int_{\frac{\delta_2^1 l_2}{c_2}}^t (h_{2H}(t-\theta) - h_0) k_3^2(\theta) d\theta + k_1^2(\theta) h_0 \int_{\frac{\delta_2^1 l_2}{c_2}}^t k_7^2(\theta) l(t-\theta) d\theta - \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{k_2} \int_{\frac{\delta_2^3 l_2}{c_2}}^t q_{2K}(t-\theta) k_4^2(\theta) d\theta + \frac{1}{k_2} \int_{\frac{\delta_2^4 l_2}{c_2}}^t q_{2K}(t-\theta) k_5^2(\theta) d\theta \\
& \int_0^t q_2(t-\theta, \delta_2) l(\theta) d\theta + \int_{\frac{2l_2}{c_2}}^t q_2(t-\theta, \delta_2) k_1^2(\theta) d\theta - k_2 \int_{\frac{\delta_2^1 l_2}{c_2}}^t (h_{2H}(t-\theta) - h_0) k_2^2(\theta) d\theta - \\
& - k_2 \int_{\frac{\delta_2^2 l_2}{c_2}}^t (h_{2H}(t-\theta) - h_0) k_3^2(\theta) d\theta + \int_{\frac{\delta_2^3 l_2}{c_2}}^t q_{2K}(t-\theta) k_4^2(\theta) d\theta - \int_{\frac{\delta_2^4 l_2}{c_2}}^t q_{2K}(t-\theta) k_5^2(\theta) d\theta
\end{aligned}$$

(13)

Интегральные уравнения (10) ÷ (13) могут быть решены численно, если заменить интегралы суммами.

В связи с этим, используя связь между непрерывным временем t и дискретным n ($n = 0, 1, 2, \dots$) в виде $t = nT/\lambda$ [15-17] (где $T = 2\tau$, $\tau = \sum_{i=1}^2 \tau_i$, $\tau_i = \frac{l_i}{c_i}$ – время распространения волны в один конец i -го участка; λ – любое целое число), производим дискретизацию уравнений (10) ÷ (13) при выбранном интервале T/λ , заменяя операцию непрерывного интегрирования суммированием, пользуясь формулой трапеций.

При этом, вместо (10) ÷ (13) относительно решетчатых функций $h_1[n, \delta_1]$, $q_1[n, \delta_1]$, $h_2[n, \delta_2]$, $q_2[n, \delta_2]$ получаем следующие выражения:

$$\begin{aligned}
h_1[n, \delta_1] &= \sum_{m=r_1 \lambda \delta_1}^n [k_2^1[m](h_{1H}[n-m] - h_0) + k_2^1[n-m+1](h_{1H}[m-1] - h_0)] + \\
&+ \sum_{m=r_1 \lambda (1-\delta_1)}^n [k_3^1[m](h_{1H}[n-m] - h_0) + k_3^1[n-m+1](h_{1H}[m-1] - h_0)] + \\
&+ \sum_{m=0.5 r_1 \lambda (1-2\delta_1)}^n [k_4^1[m](h_{1K}[n-m] - h_0) + k_4^1[n-m+1](h_{1K}[m-1] - h_0)] - \\
&- \sum_{m=0.5 r_1 \lambda (1+2\delta_1)}^n [k_5^1[m](h_{1K}[n-m] - h_0) + k_5^1[n-m+1](h_{1K}[m-1] - h_0)] + \\
&+ h_0 \sum_{m=0}^n (1[m]1[n-m] + 1[n-m+1]1[m-1]) + \\
&+ h_0 \sum_{m=r_1 \lambda}^n (1[m]k_1[n-m] + 1[n-m+1]k_1^1[m-1]) + \\
&+ \sum_{m=r_1 \lambda}^n (k_1^1[m]h_1[n-m, \delta_1] + k_2^1[n-m+1]h_1[m-1, \delta_1]) - \\
&- \sum_{m=1}^n (1[m]h_1[n-m, \delta_1] + 1[n-m+1]h_1[m-1, \delta_1]),
\end{aligned} \tag{14}$$

где

$$k_3^1[n] = \begin{cases} 0, & \text{при } n < \theta_3^{11} \\ e^{-\theta_3^1} + \frac{\theta_3^1}{2} \sum_{m=\theta_3^{11}+1}^n \sum_{i=0}^1 B_{\theta_3^{11}}^1[m-i], & \text{при } n > \theta_3^{11} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \vartheta &= \overline{1,5}, & \theta_1^1 &= 2a_1\tau_1, & \theta_1^{11} &= r_1\lambda, & \theta_2^1 &= 2a_1\tau_1\delta_1, & \theta_2^{11} &= r_1\lambda\delta_1, \\ \theta_3^1 &= 2a_1\tau_1(1-\delta_1), & \theta_3^{11} &= r_1\lambda(1-\delta_1), & \theta_4^1 &= a_1\tau_1(1-2\delta_1), \\ \theta_4^{11} &= 0,5r_1\lambda(1-2\delta_1), & \theta_5^1 &= a_1\tau_1(1+2\delta_1), & \theta_5^{11} &= 0,5r_1\lambda(1+2\delta_1), \end{aligned}$$

$$B_{\theta_3^{11}}^1[n] = e^{-\frac{a_1 T n}{\lambda}} \frac{I_1 \left[\frac{a_1 T}{\lambda} \sqrt{n^2 - (\theta_3^{11})^2} \right]}{\sqrt{n^2 - (\theta_3^{11})^2}},$$

$$r_1 = \frac{\tau_1}{\tau},$$

$$\begin{aligned} q_1[n, \delta_1] &= \sum_{m=r_1\lambda\delta_1}^n [k_6^1[m](h_{1H}[n-m]-h_0) + k_6^1[n-m+1]h_{1H}([m-1]-h_0)] + \\ &+ \sum_{m=r_1\lambda(1-\delta_1)}^n [k_7^1[m](h_{1H}[n-m]-h_0) + k_7^1[n-m+1](h_{1H}[n-m]-h_0)] - \\ &- \sum_{m=0,5r_1\lambda(1-2\delta_1)}^n [k_8^1[m](h_{1K}[n-m]-h_0) + k_8^1[n-m+1](h_{1K}[n-m]-h_0)] - \\ &- \sum_{m=0,5r_1\lambda(1+2\delta_1)}^n [k_9^1[m](h_{1H}[n-m]-h_0) + k_9^1[n-m+1](h_{1H}[n-m]-h_0)] + \\ &+ \sum_{m=r_1\lambda}^n (k_1^1[m]q_1[n-m, \delta_1] + k_1^1[n-m+1]q_1[m-1, \delta_1]) - \\ &- \sum_{m=1}^n (1[m]q_1[n-m, \delta_1] + 1[n-m+1]q_1[m-1, \delta_1]), \end{aligned} \tag{15}$$

где

$$K_{\vartheta_1}^1[n] = \begin{cases} 0, & \text{при } n < \theta_{\vartheta_1}^1 \\ e^{-\frac{a_1 T n}{\lambda}} I_0 \left(\frac{a_1 T}{\lambda} \sqrt{n^2 - (\theta_{\vartheta_1}^1)^2} \right), & \text{при } n > \theta_{\vartheta_1}^1 \end{cases},$$

$$\vartheta_1 = \overline{6,9}, \quad \theta_6^1 = \theta_2^{11},$$

$$\theta_7^1 = \theta_3^{11}, \quad \theta_8^1 = \theta_4^{11}, \quad \theta_9^1 = \theta_5^{11},$$

$$\begin{aligned}
h_2[n, \delta_2] &= \sum_{m=0.5r_2\lambda\delta_2^1}^n [k_2^2[m](h_{2H}[n-m]-h_0) + k_2^2[n-m+1](h_{2H}[m-1]-h_0)] + \\
&+ \sum_{m=0.5r_2\lambda\delta_2^2}^n [k_3^2[m](h_{2H}[n-m]-h_0) + k_3^2[n-m+1](h_{2H}[m-1]-h_0)] - \\
(16) \quad &- \frac{1}{k_2} \sum_{m=0.5r_2\lambda\delta_2^3}^n [k_4^2[m](q_{2K}[n-m]-h_0) + k_4^2[n-m+1](q_{2K}[m-1]-h_0)] + \\
&+ \frac{1}{k_2} \sum_{m=0.5r_2\lambda\delta_2^4}^n (k_5^2[m]q_{2K}[n-m] + k_5^2[n-m+1]q_{2K}[m-1]) + \\
&\quad + h_0 \sum_{m=0}^n (1[m]k_6^2[n-m] + 1[n-m+1]k_6^2[m-1]) - \\
&\quad - \sum_{m=r_2\lambda}^n (k_7^2[m]h_2[n-m, \delta_2] + k_7^2[n-m+1]h_2[m-1, \delta_2]) + \\
&\quad + h_0 \sum_{m=r_2\lambda}^n (1[m]k_7^2[n-m] + 1[n-m+1]k_7^2[m-1]) - \\
&\quad - \sum_{m=1}^n (k_6^2[m]h_2[n-m, \delta_2] + k_6^2[n-m+1]h_2[m-1, \delta_2]) \\
q_2[n, \delta_2] &= k_2 \sum_{m=0.5r_2\lambda\delta_2^1}^n [k_2^2[m](h_{2H}[n-m]-h_0) + k_2^2[n-m+1](h_{2H}[m-1]-h_0)] - \\
&- k_2 \sum_{m=0.5r_2\lambda\delta_2^2}^n [k_3^2[m](h_{2H}[n-m]-h_0) + k_3^2[n-m+1](h_{2H}[m-1]-h_0)] + \\
&\quad + \sum_{m=0.5r_2\lambda\delta_2^3}^n [k_4^2[m]q_{2K}[n-m] + k_4^2[n-m+1]q_{2K}[m-1]] - \\
&\quad - \sum_{m=0.5r_2\lambda\delta_2^4}^n (k_5^2[m]q_{2K}[n-m] + k_5^2[n-m+1]q_{2K}[m-1]) - \\
&\quad - \sum_{m=r_2\lambda}^n (k_1^2[m]q_2[n-m, \delta_2] + k_1^2[n-m+1]q_2[m-1, \delta_2]) - \\
&\quad - \sum_{m=1}^n (1[m]q_2[n-m, \delta_2] + 1[n-m+1]q_2[m-1, \delta_2]) \quad ,
\end{aligned} \tag{17}$$

где

$$K_{\vartheta_2}^2[n] = \begin{cases} 0 & \text{при } n < \vartheta_{\vartheta_2}^1 \\ e^{-\vartheta_{\vartheta_2}^2} + \frac{\vartheta_{\vartheta_2}^2}{2} \sum_{m=\vartheta_{\vartheta_2}^{12}+1}^n \sum_{i=0}^1 B_{\vartheta_{\vartheta_2}^{12}}^2[m-i], & \text{при } n > \vartheta_{\vartheta_2}^2 \end{cases}$$

$$\vartheta_2 = 1, 4, 5, \quad \vartheta_1^2 = 2a_2\tau_2, \quad \vartheta_1^{12} = r_2\lambda, \quad \vartheta_4^2 = a_2\tau_2\delta_2^3, \quad \vartheta_4^{12} = 0,5r_2\lambda\delta_2^3$$

$$\vartheta_5^2 = a_2\tau_2\delta_2^4, \quad \vartheta_3^{12} = 0,5r_2\lambda\delta_2^4, \quad r_2 = \frac{\tau_2}{\tau},$$

$$K_{\vartheta_3}^2[n] = \begin{cases} 0 & \text{при } n < \vartheta_{\vartheta_3}^1 \\ e^{-\frac{a_2 T n}{\lambda}} I_0\left(\frac{a_2 T}{\lambda} \sqrt{n^2 - (\vartheta_{\vartheta_3}^2)^2}\right) & \text{при } n > \vartheta_{\vartheta_3}^2 \end{cases},$$

$$\vartheta_3 = 2, 3, \quad \vartheta_2^2 = 0,5r_2\lambda\delta_2^1, \quad \vartheta_3^2 = 0,5r_2\lambda\delta_2^2,$$

$$k_6^2[n] = e^{-\frac{a_2 T n}{\lambda}} I_0\left(\frac{a_2 T}{\lambda} n\right),$$

$$k_7^2[n] = e^{-\frac{a_2 T n}{\lambda}} I_0\left(\frac{a_2 T}{\lambda} \sqrt{n^2 - (r_2\lambda)^2}\right)$$

Погрешность расчета связана с величиной λ . Чем больше выбрано число λ , тем в меньшей мере характеристики непрерывной функции отличаются от соответствующих характеристик решетчатых.

Полученные рекуррентные соотношения (14)÷(17) позволяют определять изменение напора и расхода в любой точке магистрального нефтепродуктопровода в произвольный момент времени при последовательной перекачке разноразмерных нефтепродуктов и легко реализуются на компьютере.

В рекуррентные соотношения (14)÷(17) входят неизвестные функции $h_{1H}[n]$ (изменение напора в начале трубы), $h_{1K}[n]$ (изменение напора в конце первого участка), $q_{2K}[n]$ (изменение расхода в конце трубы). Для определения значения напора $h_{1H}[n]$ необходимо решить уравнение движения вращающихся частей насосного агрегата совместно с уравнением движения нефтепродукта в магистральном нефтепродуктопроводе в точке $x = 0$.

В связи с этим, уравнения движения насосного агрегата в относительных единицах можно представить в виде [6, 8, 9]:

$$T_d \frac{dv(t)}{dt} = \mu_d(t) - \mu_c(t), \quad (18)$$

где $T_d = \frac{n_c}{M_H} \cdot \frac{GD^2}{375}$ --- постоянная времени; n_c - синхронная частота вращения

приводного двигателя насосного агрегата; GD^2 - маховый момент насоса;

$$GD^2 = G' D'^2 + G'' D''^2,$$

$G' D'^2$ - маховый момент колеса насоса; $G'' D''^2$ - маховый момент на валу насосного агрегата; M_H - номинальный момент на валу насосного агрегата;

$\mu_d(t) = \frac{M_d(t)}{M_H}$ - вращающийся момент электродвигателя насосного агрегата;

$\mu_c(t) = \frac{M_c(t)}{M_H}$ - момент сопротивления насоса; $\nu(t) = \frac{n(t)}{n_c}$ - текущая частота вращения вала насоса.

В рассматриваемом случае в качестве приводного двигателя насосного агрегата, используется асинхронный двигатель.

При этом вращающийся момент $\mu_d(t)$ является нелинейной функцией частоты вращения, т.е. $\mu_d(t) = \Phi[\nu(t)]$.

Аппроксимируя нелинейную зависимость $\mu_d(t) = \Phi[\nu(t)]$ кусочно - постоянной функцией, получим:

$$\mu_d(t) = \hat{a}_j \pm \hat{b}_j \nu(t), \quad (19)$$

где $j = \overline{1, k_0}$, k_0 - число аппроксимируемых участков; \hat{a}_j, \hat{b}_j -- параметры линеаризации в соответствующих участках механической характеристики приводного двигателя насосного агрегата.

Уравнение (18) с учетом выражения (19) в дискретной форме можно представить в виде:

$$\nu[n+1] = \frac{T}{\lambda T_d} \hat{a}_j + \left(1 \pm \frac{T}{\lambda T_d} \hat{b}_j \right) \nu[n] - \frac{T}{\lambda T_d} \mu_c[n] \quad (20)$$

Напорная характеристика центробежного насосного агрегата в пределах рабочей зоны с достаточной точностью аппроксимируется параболой:

$$h_{нас}[n] = a \nu^2[n] - b q_{1H}^2[n] \quad (21)$$

где a, b -- коэффициенты аппроксимации напорной характеристики насосного агрегата; $h_{нас}[n] = \frac{H_{нас}[n]}{H_{ном1}}$.

Мощностная характеристика центробежного насосного агрегата аппроксимируется выражением;

$$P_{нас}[n] = \hat{c}_1 \nu^3[n] + \hat{d}_1 \nu^2[n] q_{1H}[n], \quad (22)$$

где $P_{нас}[n] = \frac{N_{нас}[n]}{N_{ном}}$, $N_{ном}$ - номинальная мощность на валу насосного агрегата;

\hat{c}_1, \hat{d}_1 - коэффициенты аппроксимации мощностной характеристики насосного агрегата.

Момент сопротивления на валу центробежного насосного агрегата определяется из выражения:

$$\mu_c[n] = \frac{P_{нас}[n]}{\nu[n]} \quad (23)$$

Выражение (23) с учетом (22) будет:

$$\mu_c[n] = \hat{c}_1 \nu^2[n] + \hat{d}_1 \nu [n] q_{1H}[n] \quad (24)$$

Изменение напора на выходе насосного агрегата определяется из выражения:

$$h_{1H}[n] = h_0 + h_{нас}[n] \quad (25)$$

где h_0 - напор на входе насосного агрегата.

Выражение (15) при $\delta_1 = 0$ можно представить в виде:

$$q_{1H}[n] = B_1[n] + \sum_{m=0}^n [\bar{k}_6^1[m](h_{1H}[n-m] - h_0) + \bar{k}_6^1[n-m+1](h_{1H}[m-1] - h_0)], \quad (26)$$

где

$$\begin{aligned} B_1[n] = & \sum_{m=r_1\lambda}^n (\bar{k}_7^1[m](h_{1H}[n-m] - h_0) + \bar{k}_7^1[n-m+1](h_{1H}[m-1] - h_0) - \\ & - 2 \sum_{m=0,5r_1\lambda}^n [\bar{k}_8^1[m](h_{1K}[n-m] - h_0) + \bar{k}_8^1[n-m+1](h_{1K}[m-1] - h_0)] + \\ & + \sum_{m=r_1\lambda}^n [k_1^1[m]q_{1H}[n-m] + k_1^1[n-m+1]q_{1H}[m-1]] - \\ & - \sum_{m=1}^n (1[m]q_{1H}[n-m] + 1[n-m+1]q_{1H}[m-1]) \end{aligned}$$

$$\bar{K}_6^1[n] = e^{-\frac{a_1 T}{\lambda} n} I_0\left(\frac{a_1 T}{\lambda} n\right),$$

$$\bar{K}_7^1[n] = e^{-\frac{a_1 T}{\lambda} n} I_0\left(\frac{a_1 T}{\lambda} \sqrt{n^2 - (r_1 \lambda)^2}\right)$$

$$\bar{K}_8^1[n] = e^{-\frac{a_1 T}{\lambda} n} I_0\left(\frac{a_1 T}{\lambda} \sqrt{n^2 - (0,5r_1 \lambda)^2}\right)$$

Выражение (26) с учетом выражения (21), (25) принимает следующий вид:

$$q_{1H}[n] = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4bB_1^{11}[n]}}{2b}, \quad (27)$$

где

$$B_1^{11}[n] = B_1[n] + a\nu^2[n]$$

$$B_1[n] = B_1[n] + \sum_{m=1}^n [\bar{k}_6^1[m](h_{1H}[n-m] - h_0) + \bar{k}_6^1[n-m+1](h_{1H}[m-1] - h_0)]$$

Для определения изменения напора в конце первого участка ($h_{1k}[n]$), согласно условиям сопряжения, можно представить:

$$q_{1K}[n] = q_{2H}[n], \quad (28)$$

$$h_{1k}[n] = h_{2H}[n], \quad (29)$$

Определяя выражения для расходов $q_{1K}[n]$, $q_{2H}[n]$ соответственно из (15), (17) с учетом (28), (29), осуществляется переход к нахождению значения функции $h_{1k}[n]$.

Для определения изменения расхода в конце магистрального нефтепродуктопровода $q_{2K}[n]$, согласно граничным условиям, имеем:

$$h_{2k}[n] = k_1 q_{2k}[n] \quad (30)$$

где

$$k = \frac{\mu}{b_1}$$

В выражении (30) значения напора $h_{2k}[n]$ при $x = L_2$ определяется из рекуррентного соотношения (16).

Таким образом, последовательно определяя значения функций $h_{1H}[n]$, $h_{1k}[n]$, $q_{2k}[n]$ осуществляется переход к нахождению значения напора и расхода в любой точке исходной системы по рекуррентным соотношениям (14)÷(17).

Описанная методика, позволяющая заменять операции непрерывного интегрирования суммированием, пользуясь формулой трапеций, значительно повышает точность расчетов динамических процессов, возникающих в магистральных нефтепродуктопроводах при последовательной перекачке разноразных нефтепродуктов. Предложенная методика позволяет свести решение сложной задачи по переходным процессам в магистральном нефтепродуктопроводе к достаточно простым алгоритмам. Полученные рекуррентные формулы удобны для расчета на компьютере. Результаты данной работы могут быть использованы как при проектировании, так и при эксплуатации магистральных нефтепродуктопроводов.

-
1. Корелов М.А., Розенберг Г.Д. Нестационарные движения при последовательной перекачке вязких жидкостей в трубах. Изв. вузов Нефть и газ, 1979, № 3.
 2. Корелов М.А., Розенберг Г.Д. и др. Исследование нестационарных процессов течения однородных жидкостей на продуктопроводе Куйбышев-Брянск. Нефтяное хозяйство, 1978, № 5.
 3. Корелов М.А. Об использовании численных методов при расчете нестационарных процессов при последовательной перекачке. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов М., ВНИИОЭНГ, 1978, №8.
 4. Корелов М.А. К исследованию нестационарных процессов при последовательной перекачке нефтепродуктов. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. М., ВНИИОЭНГ, 1978, №9.
 5. Кадымов Я.Б., Мамедов А.И., Аскер-заде Б.А., Алиев Р.М. Численный метод расчета нестационарных процессов в магистральных продуктопроводах при последовательной перекачке нефтепродуктов. Доклады АН Азерб. ССР, 1981, № 6.
 6. Кадымов Я.Б., Мамедов А.И., Алиев Р.М. Численный метод расчета нестационарного процесса в магистральном продуктопроводе, оборудованном центробежным насосным агрегатом, при последовательной перекачке нефтепродуктов. Изв. вузов Нефть и газ, 1981, № 2
 7. Юфин В.А., Мамедов А.И., Алиев Р.М., Аллахвердиев В.А. Методика расчета нестационарных процессов в магистральных нефтепродуктопроводах при последовательной перекачке разноразных нефтепродуктов. Транспорт хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. М., ЦНИИТЭнефтихим, 1985, № 5.
 8. Мамедов А.И. Методы расчета неустановившихся режимов работы сложных магистральных трубопроводов. М.: ВНИИОЭНГ, выпуск1 (70), 1985.
 9. Яковлев Е.И., Мамедов А.И. и др. Методика расчета переходных процессов в сложных разветвленных нефте-и нефтепродуктопроводах. Изв. вузов Нефть и газ, 1990, № 6.
 10. Кадымов Я.Б. Переходные процессы в системах с распределенными параметрами. М.: Физматгиз, 1968.

11. *Пашаев А.М., Мехтиева А.Ш., Алиев Я. А., Мамедов А.И.* Новый метод определения расхода нефти, газа и нефтепродуктов для измерения диафрагменными расходомерами в магистральных газо, нефти и нефтепродуктопроводах с учетом реальных условий - динамических режимов их работы. Изв.НАН Азербайджана серия физико- технических и математических наук, 2005, №3
12. *Пашаев А. М., Бабаев М.А., Алиев Я. А., Мамедов А. И., Гусейнов В.С.* Численное моделирование переходных процессов в электрических цепях с распределенными параметрами Ученые записки Национальной Академии Авиации, 2006, № 2.
13. *Пашаев А. М., Мехтиева А.Ш., Алиев Я. А., Мамедов А. И.* Компьютерное моделирование переходных процессов в электрических цепях с распределенными параметрами при учете потерь. Изв. НАН Азербайджана серия физико-технических и математических наук, 2006, № 4.
14. *Пашаев А. М., Мехтиева А.Ш., Алиев Я. А., Мамедов А. И.* Развитие теории динамики в сложных трубопроводных системах авиа и жидкостных ракетных двигателей с учетом влияния трения жидкости о стенки трубы. Доклады НАН Азербайджана, 2006, № 3-4.
15. *Пашаев А.М., Эфендиев О.З., Мамедов А.И., Азизов Р.Р.* Компьютерное моделирование динамических процессов в магистральных нефтепродуктопроводах при последовательной перекачке разноразных нефтепродуктов. Доклады НАН Азерб. 2007, № 1
16. *Пашаев А.М., Эфендиев О.З., Мамедов А.И., Азизов Р.Р.* Численное моделирование динамических процессов в магистральных нефтепродуктопроводах при последовательной перекачке разноразных нефтепродуктов. Проблемы энергетики, 2007, №2
17. *Пашаев А.М., Эфендиев О.З., Мамедов А.И., Азизов Р.Р.* Численное моделирование динамических процессов в разветвленных магистральных нефтепродуктопроводах при последовательной перекачке разноразных нефтепродуктов. Доклады НАН Азерб. 2007, № 2

NASOS QURĞUSU İLƏ TƏCHİZ EDİLMİŞ MAGISTRAL NEFT MƏHSULLARI KƏMƏRLƏRİNDƏ NEFT MƏHSULLARI ARDICIL VURULARKƏN, KƏMƏRDƏ BAŞ VERƏN DİNAMİK PROSESLƏRİN ƏDƏDİ ÜSÜLLƏ TƏYİNİ

PAŞAYEV A.M., ƏFƏNDİYEV O.Z., MƏMMƏDOV A.İ., ƏZİZOV R.R.

Məqalədə nasos qurğusu ilə təchiz edilmiş magistral neft məhsulları kəmərlərində iki neft məhsulu ardıcıl vurularkən, kəmərdə baş verən dinamik proseslərin hesablaması üçün yeni ədədi üsul təklif edilmişdir.

THE COMPUTER MODELLING CALCULATION ON DYNAMIC PROSESSES OF THE CONSEQUENT TRANSFER CONDITIONS OF OIL PRODUCTION MAIN PRODUCT CONDUCTORS WITH PUMPING

PASHAYEV A.M., EFENDIYEV O.Z., MAMEDOV A.I., AZIZOV R.R.

The computer modelling calculation on dynamic proseses of the consequent transfer conditions of oil production main product conductors with pumping is offered.