

УДК. 681.308

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОДУКТОПРОВОДАХ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПЕРЕКАЧКЕ РАЗНОСОРТНЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ

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

Национальная Академия Авиации

Представлен новый численный метод моделирования динамических процессов, возникающих при произвольном изменении скорости движения в начале и давления в конце при произвольном заданном законе изменения скорости движения в начале и давления в конце его, при замене операции непрерывного интегрирования суммированием пользуясь формулой трапеции.

В настоящее время последовательная перекачка различных по физико-химическим свойствам (плотность, вязкость) нефтепродуктов по магистральному трубопроводу приобретает все большее практическое значение.

Вопросы анализа стационарных режимов работ магистральных нефтепродуктопроводов при последовательной разноразрядных нефтепродуктов достаточно рассмотрены в научной литературе [1-6].

Однако как показывает проведенный анализ, режим работы магистральных нефтепродуктопроводов в процессе эксплуатации, в основном является переменным.

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 (моделировании различных технологических ситуаций для прогностического определения реакции системы на управляющие воздействия имитация ее поведения в аварийных режимах, определения влияния нестационарности режимов на выполнение оперативных планов поставки нефтепродуктов попутным потребителям) [1, 6, 11, 15, 18].

Вопросы динамики при движении однородной жидкости по магистральному нефтепродуктопроводу рассмотрены в работах [7-11,19,22]. Вопросы же динамики при последовательной перекачке разноразрядных 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 [12-20, 26].

Это объясняется тем, что в процессе последовательной перекачки разнородных нефтепродуктов, возникающие нестационарные процессы имеют свои особенности [12-20, 26].

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 [12-20, 26].

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

Ежегодно аварии в магистральных нефтепродуктопроводах, вызванные возникновением различных аварийных ситуаций, наносят огромный материальный ущерб отрасли [1-6, 12-20, 22, 26].

В связи с этим, изучение динамических режимов в магистральных нефтепродуктопроводах при последовательной перекачке разнородных нефтепродуктов необходимо для:

- правильного расчета и выбора параметров системы защиты нефтепродуктопровода от гидравлических ударов;
- обоснования быстродействия средств по минимальным и максимальным давлениям и системы автоматического регулирования давления;
- определения диаметра и места подключения отводов;
- осуществления правильной расстановки насосных станций и т.п.

Анализ динамических процессов, возникающих в магистральных нефтепродуктопроводах, представляет важный практический интерес при оперативно-диспетчерском управлении динамическим режимом работы с целью своевременного обнаружения, а также ликвидации аварийных ситуаций. Применения аналитических методов [7-12] для решения задач динамики в магистральных нефтепродуктопроводах при последовательной перекачке разнородных нефтепродуктов, в реальных условиях из-за переменности во времени функциями произвольного в общем случае вида граничных условий [13-20, 26] вызывают большие математические трудности.

В связи с широким внедрением компьютерной техники в практику инженерных расчетов в настоящее время становится особенно эффективным применение численных методов расчета переходных процессов в магистральных нефтепродуктопроводах.

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

Вместе с тем такой подход существенно расширяют возможности постановки многих практических задач в области решения проблемы динамики в магистральных нефтепродуктопроводах.

Преимуществом численных методов перед аналитическими методами 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).

Динамические процессы, протекающие в магистральном трубопроводе описываются дифференциальными уравнениями в частных производных гиперболического типа, поскольку магистральный нефтепродуктопровод—система с распределенными параметрами [7-20, 22, 26].

Одним из специализированных численных методов расчета динамических процессов в магистральных нефтепродуктопроводах при последовательной перекачке разноразных нефтепродуктов, является численный метод, основанный на теории импульсных систем [16-20]. При этом в качестве математического аппарата используется дискретное преобразование Лапласа [21].

Общим недостатком указанного метода [16-20] является, во-первых, то, что применение импульсных систем [21] 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 [7,12÷15] 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 [22-26].

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 функциям 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 [22-26], в отличие от существующих методов [7, 10, 12, 15, 16÷21], в зависимости от заданной точности расчета, позволяет заменить операцию непрерывного интегрирования суммированием, пользуясь формулами не только прямоугольников, но и трапеции, Симпсона.

Указанные свойства подхода [22-26] существенно расширяют круг решаемых практических задач.

Однако, методы, предложенные в работах [22-26] для численного моделирования динамических процессов в системах с распределенными параметрами основывались на замене операции непрерывного интегрирования суммированием, пользуясь формулой прямоугольников.

Следует отметить, что магистральные нефтепродуктопроводы при последовательной перекачке разноразных нефтепродуктов, относятся к классу неоднородных систем с распределенными параметрами, состоящей из разных однородных сред, т.е. кусочно-однородной среды [12÷20,26].

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 места 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 искомых 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 [20-26], при замене операции непрерывного интегрирования суммированием пользуясь формулой трапеций для разработки численного метода моделирования динамических процессов, возникающих в магистральных нефтепродуктопроводах при последовательной перекачке двух разнородных нефтепродуктов, при произвольном изменении скорости движения в начале и давления в конце его (рис 1).

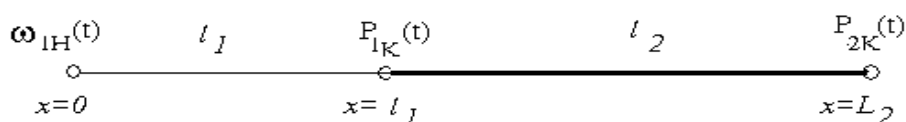


Рис.1

Для данной задачи начальные условия принимаются нулевыми:

$$P_i(\chi, t)_{t=0} = 0, \quad \omega_i(\chi, t)_{t=0} = 0$$

В рассматриваемом случае граничные условия имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \omega_1(\chi, t)_{\chi=0} &= \omega_{1H}(t) & P_1(\chi, t)_{\chi=l_1} &= P_{1K}(t) \\ P_2(\chi, t)_{\chi=l_1} &= P_{2H}(t) & P_2(\chi, t)_{\chi=L_2} &= P_{2K}(t), \end{aligned}$$

где $\omega_{1H}(t)$, $P_{2K}(t)$ - произвольный закон изменения скорости движения в начале и давления в конце трубы; $\omega_1(0, t) = \omega_{1H}(t)$, $P_{1K}(t) = P_1(l_1, t)$; $P_{2H}(t) = P_1(l_1, t)$, $P_{2K}(t) = P_2(L_2, t)$;

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

$$\begin{aligned} P_1(l_1, t) &= P_2(l_1, t), \\ \omega_1(l_1, t) &= \omega_2(l_1, t) \end{aligned}$$

Решение задачи. Решение рассматриваемой задачи позволяет определить степень влияния разнородности, последовательно перекачиваемых разнородных нефтепродуктов, на характер изменения давления и скорости движения нефтепродуктов в любом сечении нефтепродуктопровода в условиях возникновения переходных процессов.

Согласно предложенному подходу, при решении поставленной задачи на первом этапе необходимо получить Лапласово изображение для функций $P_i(\chi, t)$, $\omega_i(\chi, t)$ 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:

$$P_1(\chi, s) = b_1(s) \frac{sh\gamma_1(l_1 - \chi)}{ch\gamma_1 l_1} \omega_{1H}(s) + \frac{ch\gamma_1 \chi}{ch\gamma_1 l_1} P_{1K}(s) \quad (2)$$

$$\omega_1(\chi, s) = \frac{ch\gamma_1(l_1 - \chi)}{ch\gamma_1 l_1} \omega_{1H}(s) - \frac{1}{b_1(s)} \frac{sh\gamma_1 \chi}{ch\gamma_1 l_1} \quad (3)$$

$$P_2(\chi, s) = \frac{sh\gamma_2(L_2 - \chi)}{sh\gamma_2 l_2} P_{2H}(s) + \frac{sh\gamma_2(\chi - l_1)}{sh\gamma_2 l_2} P_{2K}(s) \quad (4)$$

$$\omega_2(\chi, s) = \frac{1}{b_2(s)} \frac{ch\gamma_2(L_2 - \chi)}{sh\gamma_2 l_2} P_{2H}(s) - \frac{1}{b_2(s)} \frac{ch\gamma_2(\chi - l_1)}{sh\gamma_2 l_2} P_{2K}(s), \quad (5)$$

где $\gamma_i = \frac{1}{c_i} \sqrt{s(s + 2a_i)}$ - операторная постоянная распространения волны для i-го участка;

$b_i(s) = \rho_i c_i \sqrt{\frac{s + 2a_i}{s}}$ - операторное волновое сопротивление для i-го участка; s - оператор преобразования Лапласа; $\omega_i(\chi, s), P_i(\chi, s), \omega_{1H}(s), P_{1K}(s), P_{2H}(s), P_{2K}(s)$ - Лапласово изображение функций $\omega_i(\chi, t), P_i(\chi, t), \omega_{1H}(t), P_{1K}(t), P_{2H}(t), P_{2K}(t)$.

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 [1,20-28], в выражениях для функций $P_i(\chi, s), \omega_i(\chi, s)$ из (2)-(5), переходя от гиперболических функций к степенным функциям, получим:

$$P_1(\delta_1, s) [k_6^1(s) + k_7^1(s)] = \rho_1 c_1 [k_2^1(s) - k_3^1(s)] \omega_{1H}(s) + [k_4^1(s) + k_5^1(s)] P_{1K}(s), \quad (6)$$

$$\omega_1(\delta_1, s) \left[\frac{1}{s} - k_1^1(s) \right] = [k_2^1(s) + k_3^1(s)] \omega_{1H}(s) - \frac{1}{\rho_1 c_1} [k_4^1(s) + k_5^1(s)] P_{1K}(s), \quad (7)$$

$$P_2(\delta_2, s) \left[\frac{1}{s} - k_1^2(s) \right] = [k_2^2(s) - k_3^2(s)] P_{2H}(s) + [k_4^2(s) - k_5^2(s)] P_{2K}(s), \quad (8)$$

$$\omega_2(\delta_2, s) \left[\frac{1}{s} - k_1^2(s) \right] = \frac{1}{\rho_2 c_2} [k_6^2(s) + k_7^2(s)] P_{2H}(s) - \frac{1}{\rho_1 c_1} [k_8^2(s) + k_9^2(s)] P_{2K}(s), \quad (9)$$

где

$$k_1^1(s) = \frac{e^{-2\gamma_1 l_1}}{s}, \quad k_2^1(s) = \frac{e^{-2\gamma_1 l_1 \delta_1}}{s}, \quad k_3^1(s) = \frac{e^{-2\gamma_1 l_1 (1 - \delta_1)}}{s},$$

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

$$k_6^1(s) = \frac{1}{\sqrt{s(s + 2a_1)}}, \quad k_7^1(s) = \frac{e^{-2\gamma_1 l_1}}{\sqrt{s(s + 2a_1)}},$$

$$k_2^2(s) = \frac{e^{-2\gamma_2 l_2 \delta_2}}{s}, \quad k_3^2(s) = \frac{e^{-\gamma_2 l_2 \delta_2^2}}{s}, \quad k_4^2(s) = \frac{e^{-\gamma_2 l_2 \delta_2^3}}{s},$$

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

$$k_7^2(s) = \frac{1}{\sqrt{s(s + 2a_2)}} e^{-\gamma_2 l_2 \delta_2^2}, \quad k_8^2(s) = \frac{1}{\sqrt{s(s + 2a_2)}} e^{-\gamma_2 l_2 \delta_2^3}, \quad k_9^2(s) = \frac{1}{\sqrt{s(s + 2a_2)}} e^{-\gamma_2 l_2 \delta_2^4},$$

$$\omega_i(\delta_i, s) = \frac{\omega_i(\delta_i, s)}{\omega_H}, \quad p_i(\delta_i, s) = \frac{P_i(\delta_i, s)}{P_{y0}}, \quad p_{iH}(s) = \frac{P_{iH}(s)}{P_{y0}}, \quad p_{iK}(s) = \frac{P_{iK}(s)}{P_{y0}}, \quad k_i = p_1 c_1 / p_i c_i$$

$p_{y0} = c_1 \rho_1 \omega_H$ - ударное давление; $\delta_i = \frac{\chi_i}{2l_i}$,

$$\begin{aligned} \delta_2^1 &= 1 - L_2' + \bar{\delta}_2, & \delta_2^2 &= 1 + L_2' - \bar{\delta}_2, \\ \delta_2^3 &= 1 + L_2'' - \bar{\delta}_2, & \delta_2^4 &= 1 - L_2'' + \bar{\delta}_2, \\ \bar{\delta}_2 &= \frac{\chi}{l_2}, \quad L_2' = \frac{L_2}{l_2}, \quad L_2'' = \frac{l_1}{l_2} \end{aligned}$$

На основе теоремы свертки [1,20-28], переходя от уравнений (6)-(9) относительно изображений к уравнениям относительно оригиналов, в системе относительных единиц, получим:

$$\int_0^t P_1(t-\theta, \delta_1) k_6^1(\theta) d\theta - \int_{\frac{2l_1}{c_1}}^t P_1(t-\theta, \delta_1) k_7^1(\theta) d\theta = \int_{\frac{2l_1 \delta_1}{c_1}}^t \omega_{1H}(t-\theta) k_2^1(\theta) d\theta - \quad (8)$$

$$- \int_{\frac{2l_1(1-\delta_1)}{c_1}}^t \omega_{1H}(t-\theta) k_3^1(\theta) d\theta + \int_{\frac{l_1(1-2\delta_1)}{c_1}}^t P_{1K}(t-\theta) k_4^1(\theta) d\theta + \int_{\frac{l_1(1+2\delta_1)}{c_1}}^t P_{1K}(t-\theta) k_5^1(\theta) d\theta,$$

$$\int_0^t \omega_1(t-\theta, \delta_1) l(\theta) d\theta + \int_{\frac{2l_1}{c_1}}^t \omega_1(t-\theta, \delta_1) k_1^1(\theta) d\theta = \int_{\frac{2\delta_1 l_1}{c_1}}^t \omega_{1H}(t-\theta) k_2^1(\theta) d\theta + \quad (9)$$

$$+ \int_{\frac{2l_1(1-\delta_1)}{c_1}}^t \omega_{1H}(t-\theta) k_3^1(\theta) d\theta - \int_{\frac{l_1(1-2\delta_1)}{c_1}}^t P_{1K}(t-\theta) k_4^1(\theta) d\theta + \int_{\frac{l_1(1+2\delta_1)}{c_1}}^t P_{1K}(t-\theta) k_5^1(\theta) d\theta$$

$$\int_0^t P_2(t-\theta, \delta_2) l(\theta) d\theta - \int_{\frac{2l_2}{c_2}}^t P_2(t-\theta, \delta_2) k_1^2(\theta) d\theta = \int_{\frac{\delta_2^1 l_2}{c_2}}^t P_{2H}(t-\theta) k_2^2(\theta) d\theta - \quad (10)$$

$$- \int_{\frac{\delta_2^1 l_2}{c_2}}^t P_{2H}(t-\theta) k_3^2(\theta) d\theta + \int_{\frac{\delta_2^1 l_2}{c_2}}^t P_{2K}(t-\theta) k_4^2(\theta) d\theta - \int_{\frac{\delta_2^1 l_2}{c_2}}^t P_{2K}(t-\theta) k_5^2(\theta) d\theta$$

$$\int_0^t \omega_2(t-\theta, \delta_2) l(\theta) d\theta - \int_{\frac{2l_2}{c_2}}^t \omega_2(t-\theta, \delta_2) k_1^2(\theta) d\theta = k_2 \int_{\frac{\delta_2^1 l_2}{c_2}}^t P_{2H}(t-\theta) k_6^2(\theta) d\theta - k_2 \int_{\frac{\delta_2^1 l_2}{c_2}}^t P_{2H}(t-\theta, \delta_2) k_7^2(\theta) d\theta - \quad (11)$$

$$- k_2 \int_{\frac{\delta_2^1 l_2}{c_2}}^t P_{2K}(t-\theta, \delta_2) k_8^2(\theta) d\theta - k_2 \int_{\frac{\delta_2^1 l_2}{c_2}}^t P_{2K}(t-\theta, \delta_2) k_9^2(\theta) d\theta$$

Интегральные уравнения (8)-(11) 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 $t = nT/\lambda$ [1,20-28] (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 (8)-(11), при выбранном интервале T/λ , заменяя операцию непрерывного интегрирования суммированием, пользуясь формулой трапеций [1].

При этом вместо () \div () относительно решетчатых функций $P_1[n, \delta_1]$, $\omega_1[n, \delta_1]$, $P_2[n, \delta_2]$, $\omega_2[n, \delta_2]$ получаем следующие выражения:

$$\sum_{m=0}^n \left(k_6^1[m] P_1[n-m, \delta_1] + k_6^1[n-m+1] P_1[m-1, \delta_1] \right) +$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{m=r_1\lambda}^n (k_7^1[m]P_1[n-m, \delta_1] + k_7^1[n-m+1]P_1[m-1, \delta_1]) = \\
& = \sum_{m=r_1\lambda\delta_1}^n (k_8^1[m]\omega_{1H}[n-m] + k_2^1[n-m+1]\omega_{1H}[m-1]) - \\
& - \sum_{m=r_1\lambda(1-\delta_1)}^n (k_3^1[m]\omega_{1H}[n-m] + k_3^1[n-m+1]\omega_{1H}[m-1]) + \\
& + \sum_{m=0,5r_1\lambda(1-2\delta_1)}^n (k_4^1[m]P_{1K}[n-m] + k_4^1[n-m+1]P_{1K}[m-1]) + \\
& + \sum_{m=0,5r_1\lambda(1+2\delta_1)}^n (k_5^1[m]P_{1K}[n-m] + k_5^1[n-m+1]P_{1K}[m-1]) ,
\end{aligned}$$

где

$$k_9^1[n] = \begin{cases} 0 & \text{при } n < \theta_9^{11} \\ e^{-\theta_9^1} + \frac{\theta_9^1}{2} \sum_{m=\theta_9^{11}+1}^n \sum_{i=0}^1 B_{\theta_9^1}^1[m-i] & \text{при } n < \theta_9^1 \end{cases}$$

$$\vartheta = \overline{1,5}, \quad \theta_1^1 = 2a_1\tau_1, \quad \theta_1^{11} = r_1\lambda, \quad \theta_2^1 = 2a_1\tau_1\delta_1, \quad \theta_2^{11} = r_1\lambda\delta_1, \quad \theta_3^1 = 2a_1\tau_1(1-\delta_1), \quad \theta_3^{11} = r_1\lambda(1-\delta_1),$$

$$B_{\theta_9^1}^1[n] = e^{-\frac{a_1Tn}{\lambda}} \frac{I_1\left[\frac{a_1T}{\lambda}\sqrt{n^2 - (\theta_9^{11})^2}\right]}{\sqrt{n^2 - (\theta_9^{11})^2}}$$

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

$$K_{\vartheta_1}^1[n] = \begin{cases} 0 & \text{при } n < \theta_{\vartheta_1}^1 \\ e^{-\frac{a_1Tn}{\lambda}} I_0\left(\frac{a_1T}{\lambda}\sqrt{n^2 - (\theta_{\vartheta_1}^1)^2}\right) & \text{при } n < \theta_{\vartheta_1}^1 \end{cases},$$

$$\vartheta_1 = 4,5, \quad \theta_4^1 = a_1\tau_1(1-2\delta_1), \quad \theta_5^1 = a_1\tau_1(1+2\delta_1),$$

$$k_6^1[n] = e^{-\frac{a_1Tn}{\lambda}} I_0\left(\frac{a_1T}{\lambda}n\right),$$

$$k_7^1[n] = e^{-\frac{a_1Tn}{\lambda}} I_0\left(\frac{a_1T}{\lambda}\sqrt{n^2 - (r_1\lambda)^2}\right)$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=0}^n (1[m]\omega_1[n-m, \delta_1] + 1[n-m+1]\omega_1[m-1, \delta_1]) + \\
& + \sum_{m=r_1\lambda}^n (k_1^1[m]\omega_1[n-m, \delta_1] + k_1^1[n-m+1]\omega_1[m-1, \delta_1]) = \\
& = \sum_{m=0,5r_1\lambda\delta_1}^n (k_2^1[m]\omega_{1H}[n-m] + k_2^1[n-m+1]\omega_{1H}[m-1]) + \\
& + \sum_{m=0,5r_1\lambda\delta_1}^n (k_3^1[m]\omega_{1H}[n-m] + k_3^1[n-m+1]\omega_{1H}[m-1]) - \\
& - \sum_{m=0,5r_1\lambda(1-\delta_1)}^n (k_4^1[m]P_{1K}[n-m] + k_4^1[n-m+1]P_{1K}[m-1]) +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{m=0.5r_1\lambda(1+\delta_1)}^n \left(k_5^1[m]P_{1K}[n-m] + k_5^1[n-m+1]P_{1k}[m-1] \right) \\
& \quad \sum_{m=0}^n \left(1[m]P_2[n-m, \delta_2] + 1[n-m+1]P_2[m-1, \delta_2] \right) - \\
& \quad - \sum_{m=r_2\lambda}^n \left(k_1^2[m]P_2[n-m, \delta_2] + k_1^2[n-m+1]P_2[m-1, \delta_2] \right) = \\
& = \sum_{m=r_2\lambda\delta_2^1}^n \left(k_2^2[m]P_{2H}[n-m] + k_2^2[n-m+1]P_{2H}[m-1] \right) - \\
& - \sum_{m=0.5r_2\lambda\delta_2^2}^n \left(k_3^2[m]P_{2H}[n-m] + k_3^2[n-m+1]P_{2H}[m-1] \right) + \\
& + \sum_{m=0.5r_1\lambda\delta_2^3}^n \left(k_4^2[m]P_{2K}[n-m] + k_4^2[n-m+1]P_{2k}[m-1] \right) - \\
& - \sum_{m=0,5r_2\lambda\delta_2^4}^n \left(k_5^2[m]P_{2K}[n-m] + k_5^2[n-m+1]P_{2K}[m-1] \right) \\
& k_9^1[n] = \begin{cases} 0, & \text{при } n < \theta_9^{11} \\ e^{-\theta_9^1} + \frac{\theta_9^1}{2} \sum_{m=\theta_9^{11}+1}^n \sum_{i=0}^1 B_{\theta_9^{11}}^1[m-i], & \text{при } n > \theta_9^{11} \end{cases}
\end{aligned}$$

Здесь,

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=0}^n \left(k_6^1[m]P_1[n-m, \delta_1] + k_6^1[n-m+1]P_1[m-1, \delta_1] \right) = \\
& = P_1[n, \delta_1] + \sum_{m=1}^n \left(k_6^2[m]P_1[n-m, \delta_1] + k_6^1[n-m+1]P_1[m-1, \delta_1] \right) \\
& \quad \sum_{m=0}^n \left(1[m]\omega_1[n-m, \delta_1] + 1[n-m+1]\omega_1[m-1, \delta_1] \right) = \\
& = \omega_1[n, \delta_1] + \sum_{m=1}^n \left(1[m]\omega_1[n-m, \delta_1] + 1[n-m+1]\omega_1[m-1, \delta_1] \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=0}^n \left(1[m]P_2[n-m, \delta_2] + 1[n-m+1]P_2[m-1, \delta_2] \right) = \\
& = P_2[n, \delta_2] + \sum_{m=1}^n \left(1[m]P_2[n-m, \delta_2] + 1[n-m+1]P_2[m-1, \delta_2] \right), \quad (20)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=0}^n \left(1[m]\omega_2[n-m, \delta_2] + 1[n-m+1]\omega_2[m-1, \delta_2] \right) = \\
& = \omega_2[n, \delta_2] + \sum_{m=1}^n \left(1[m]\omega_2[n-m, \delta_2] + 1[n-m+1]\omega_2[m-1, \delta_2] \right), \quad (21)
\end{aligned}$$

где при $m=0$ $P_1[m-1, \delta_1] = 0$, $\omega_1[m-1, \delta_1] = 0$,

$$k_6^2[m] = 1, \quad P_2[m-1, \delta_2] = 0, \quad \omega_2[m-1, \delta_2] = 0$$

Для определения значения решетчатой функции $P_1[n, \delta_1]$ выражение (14) с учетом (18) будет:

$$\begin{aligned}
& P_1[n, \delta_1] + \sum_{m=1}^n (k_6^1[m]P_1[n-m, \delta_1] + k_6^1[n-m+1]P_1[m-1, \delta_1]) + \\
& + \sum_{m=r_1\lambda}^n (k_7^1[m]P_1[n-m, \delta_1] + k_7^1[n-m+1]P_1[m-1, \delta_1]) = \\
& = \sum_{m=r_1\lambda\delta_1}^n (k_2^1[m]\omega_{1H}[n-m] + k_2^1[n-m+1]\omega_{1H}[m-1]) - \\
& - \sum_{m=r_1\lambda(1-\delta_1)}^n (k_3^1[m]\omega_{1H}[n-m] + k_3^1[n-m+1]\omega_{1H}[m-1]) + \\
& + \sum_{m=0.5r_1\lambda(1-2\delta_1)}^n (k_4^1[m]P_{1K}[n-m] + k_4^1[n-m+1]P_{1K}[m-1]) + \\
& + \sum_{m=0.5r_1\lambda(1+2\delta_1)}^n (k_5^1[m]P_{1K}[n-m] + k_5^1[n-m+1]P_{1K}[m-1])
\end{aligned} \tag{22}$$

Решая уравнение (22) относительно функции $P_1[n, \delta_1]$, получаем следующее рекуррентное соотношение, позволяющее последовательно вычислять функции $P_1[n, \delta_1]$

$$\begin{aligned}
P_1[n, \delta_1] = & \sum_{m=r_1\lambda\delta_1}^n (k_2^1[m]\omega_{1H}[n-m] + k_2^1[n-m+1]\omega_{1H}[m-1]) - \\
& - \sum_{m=r_1\lambda(1-\delta_1)}^n (k_3^1[m]\omega_{1H}[n-m] + k_3^1[n-m+1]\omega_{1H}[m-1]) + \\
& + \sum_{m=0.5r_1\lambda(1-2\delta_1)}^n (k_4^1[m]P_{1K}[n-m] + k_4^1[n-m+1]P_{1K}[m-1]) + \\
& + \sum_{m=0.5r_1\lambda(1+2\delta_1)}^n (k_5^1[m]P_{1K}[n-m] + k_5^1[n-m+1]P_{1K}[m-1]) - \\
& - \sum_{m=r_1\lambda}^n (k_7^1[m]P_1[n-m, \delta_1] + k_7^1[n-m+1]P_1[m-1, \delta_1]) - \\
& - \sum_{m=1}^n (k_6^1[m]P_1[n-m, \delta_1] + k_6^1[n-m+1]P_1[m-1, \delta_1])
\end{aligned} \tag{23}$$

Проводя аналогичные операции, получаем следующие рекуррентные соотношения для решетчатых функций $\omega_1[n, \delta_1]$, $P_2[n, \delta_2]$, $\omega_2[n, \delta_2]$

$$\begin{aligned}
\omega_i[n, \delta_1] = & \sum_{m=r_1\lambda\delta_1}^n (k_2^1[m]\omega_{1H}[n-m] + k_2^1[n-m+1]\omega_{1H}[m-1]) + \\
& + \sum_{m=r_1\lambda(1-\delta_1)}^n (k_3^1[m]\omega_{1H}[n-m] + k_3^1[n-m+1]\omega_{1H}[m-1]) + \\
& - \sum_{m=0.5r_1\lambda(1-2\delta_1)}^n (k_4^1[m]P_{1K}[n-m] + k_4^1[n-m+1]P_{1K}[m-1]) + \\
& + \sum_{m=0.5r_1\lambda(1+2\delta_1)}^n (k_5^1[m]P_{1K}[n-m] + k_5^1[n-m+1]P_{1K}[m-1]) -
\end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned}
& - \sum_{m=r_1\lambda}^n (k_1^1[m]\omega_1[n-m, \delta_1] + k_1^1[n-m+1]\omega_1[m-1, \delta_1]) - \\
& \quad - \sum_{m=1}^n (1[m]\omega_1[n-m, \delta_1] + 1[n-m+1]\omega_1[m-1, \delta_1]), \\
& \quad P_2[n, \delta_2] = \sum_{m=0.5r_2\lambda\delta_2^1}^n (k_2^2[m]P_{2H}[n-m] + k_2^2[n-m+1]P_{2H}[m-1]) - \\
& \quad - \sum_{m=0.5r_2\lambda\delta_2^2}^n (k_3^2[m]P_{2H}[n-m] + k_3^2[n-m+1]P_{2H}[m-1]) - \\
& \quad + \sum_{m=0.5r_2\lambda\delta_2^3}^n (k_4^2[m]P_{2K}[n-m] + k_4^2[n-m+1]P_{2K}[m-1]) - \\
& \quad - \sum_{m=0.5r_2\lambda\delta_2^4}^n (k_5^2[m]P_{2K}[n-m] + k_5^2[n-m+1]P_{2K}[m-1]) + \quad (25) \\
& \quad + \sum_{m=r_2\lambda}^n (k_1^2[m]P_2[n-\delta_2] + k_1^2[n-m+1]P_2[m-1, \delta_2]) - \\
& \quad - \sum_{m=1}^n (1[m]P_2[n-\delta_2] + 1[n-m+1]P_2[m-1, \delta_2]), \\
& \quad \omega_2[n, \delta_2] = k_2 \sum_{m=0.5r_2\lambda\delta_2^1}^n (k_6^2[m]P_{2H}[n-m] + k_6^2[n-m+1]P_{2H}[m-1]) + \\
& \quad + k_2 \sum_{m=0.5r_2\lambda\delta_2^2}^n (k_7^2[m]P_{2H}[n-m] + k_7^2[n-m+1]P_{2H}[m-1]) - \\
& \quad - k_2 \sum_{m=0.5r_2\lambda\delta_2^3}^n (k_8^2[m]P_{2K}[n-m] + k_8^2[n-m+1]P_{2K}[m-1]) - \\
& \quad \quad - k_2 \sum_{m=0.5r_2\lambda\delta_2^4}^n (k_9^2[m]P_{2K}[n-m] + k_9^2[n-m+1]P_{2K}[m-1]) + \quad (15) \\
& \quad + \sum_{m=r_2\lambda}^n (k_1^2[m]\omega_2[n-m, \delta_2] + k_1^2[n-m+1]\omega_2[m-1, \delta_2]) - \\
& \quad - \sum_{m=1}^n (1[m]\omega_2[n-m, \delta_2] + 1[n-m+1]\omega_2[m-1, \delta_2]),
\end{aligned}$$

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 (12) ÷ (15) позволяют определять изменение давления и скорости в любой точке магистрального нефтепродуктопровода в произвольный момент времени при последовательной перекачке разноразных нефтепродуктов и легко реализуются на компьютере.

В рекуррентные соотношения (12) ÷ (15) входит неизвестная функция $P_{1K}[n]$. Определение ее значения осуществляется по следующей методике.

Согласно условию сопряжения для точки $\chi = l_1$ можно представить:

$$\omega_{1K}[n] = \omega_{2H}[n], \quad (16)$$

$$P_{1K}[n] = P_{2H}[n], \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned}\omega_{1K}[n] &= \omega_1[n, l_1], & \omega_{2H}[n] &= \omega_2[n, l_1], \\ P_{1K}[n] &= P_1[n, l_1], & P_{2H}[n] &= P_2[n, l_1]\end{aligned}$$

Определяя выражения для скоростей $\omega_{1K}[n], \omega_{2H}[n]$ из (13), (15) и подставляя их выражение в (16), с учетом равенства давлений $P_{1K}[n], P_{2H}[n]$, получим следующее рекуррентное соотношение для функции $P_{1K}[n]$:

$$\begin{aligned}P_{1K}[n] &= \frac{1}{1+k_2} \{A_1[n] - A_2[n] - \\ &\sum_{m=0}^n (k_4^{11}[m]P_{1K}[n-m] + k_4^{11}[n-m+1]P_{1K}[m-1] + \\ &+ k_2\bar{k}_6^2[m]P_{1K}[n-m] + k_2\bar{k}_6^2[n-m+1]P_{1K}[m-1])\},\end{aligned}\quad (18)$$

где

$$\begin{aligned}A_1[n] &= 2 \sum_{m=0,5r_1\lambda}^n (\bar{k}_2^1[m]\omega_{1H}[n-m] + \bar{k}_2^1[n-m+1]\omega_{1H}[m-1]) + \\ &+ \sum_{m=r_1\lambda}^n (\bar{k}_5^1[m]P_{1K}[n-m] + \bar{k}_5^1[n-m+1]P_{1K}[m-1]) - \\ &- \sum_{m=r_1\lambda}^n (k_1^1[m]\omega_{1K}[n-m] + k_1^1[n-m+1]\omega_{1K}[m-1]) - \\ &- \sum_{m=1}^n (1[m]\omega_{1K}[n-m] + 1[n-m+1]\omega_{1K}[m-1]), \\ A_2[n] &= k_2 \sum_{m=r_2\lambda}^n (\bar{k}_7^2[m]P_{1K}[n-m] + \bar{k}_7^2[n-m+1]P_{1K}[m-1]) - \\ &- 2k_2 \sum_{m=0,5r_2\lambda}^n (\bar{k}_9^2[m]P_{2K}[n-m] + \bar{k}_9^2[n-m+1]P_{2K}[m-1]) + \\ &+ \sum_{m=r_2\lambda}^n (k_1^2[m]\omega_{2H}[n-m] + k_1^2[n-m+1]\omega_{2H}[m-1]) - \\ &- \sum_{m=1}^n (1[m]\omega_{2H}[n-m] + 1[n-m+1]\omega_{2H}[m-1]),\end{aligned}$$

$$\omega_{1K}[n] = A_1[n] - \sum_{m=0}^n (k_4^{11}[m]P_{1K}[n-m] + k_4^{11}[n-m+1]P_{1K}[m-1]),$$

$$\bar{K}_2^1[n] = \begin{cases} 0, & \text{при } n < 0,5r_1\lambda \\ e^{-a_1T_1} + \frac{a_1T_1}{2} \sum_{m=0,5r_1\lambda+1}^n \sum_{i=0}^1 B_{\theta_2^1}^1[m-i], & \text{при } n > 0,5r_1\lambda \end{cases}$$

$$B_{\theta_2^1}^1[n] = e^{-\frac{a_1T}{\lambda}n} \frac{I_1\left(\frac{a_1T}{\lambda}\sqrt{n^2 - (0,5r_1\lambda)^2}\right)}{\sqrt{n^2 - (0,5r_1\lambda)^2}},$$

$$\bar{K}_4^1[n] = e^{-\frac{a_1 T}{\lambda} n} I_0\left(\frac{a_1 T}{\lambda} n\right), \quad \bar{K}_5^1[n] = e^{-\frac{a_1 T}{\lambda} n} I_0\left(\frac{a_1 T}{\lambda} \sqrt{n^2 - (r_1 \lambda)^2}\right),$$

$$\bar{K}_6^2[n] = e^{-\frac{a_2 T}{\lambda} n} I_0\left(\frac{a_2 T}{\lambda} n\right), \quad \bar{K}_7^2[n] = e^{-\frac{a_2 T}{\lambda} n} I_0\left(\frac{a_2 T}{\lambda} \sqrt{n^2 - (r_2 \lambda)^2}\right),$$

$$\bar{K}_9^2[n] = e^{-\frac{a_2 T}{\lambda} n} I_0\left(\frac{a_2 T}{\lambda} \sqrt{n^2 - (0,5 r_2 \lambda)^2}\right),$$

Таким образом, определяя значения давления $P_{ик}[n]$ из рекуррентного соотношения (18), осуществляется переход к нахождению изменения давления и скорости в любой точке магистрального нефтепродуктопровода при последовательной перекачке разноразных нефтепродуктов с помощью рекуррентных соотношений (12) ÷ (15).

Выводы

1. Предложенный новый универсальный численный метод позволяет определить с высокой точностью переходные процессы в магистральных нефтепродуктопроводах при последовательной перекачке разноразных нефтепродуктов при динамических процессах.

2. Применение метода позволяет проводить численные расчеты по простым рекуррентным соотношениям, легко реализуемым на компьютере.

Результаты данной работы также могут быть использованы при моделировании динамических режимов работы гидравлических систем авиадвигателей [27-33].

-
1. Нечваль М.В., Новоселов В.Ф., Тугунов П.И. Последовательная перекачка нефтей и нефтепродуктов по магистральным продуктопроводам. М., Недрa, 1976.
 2. Оптимизация последовательной перекачки нефтепродуктов М.В.Лурье, В.И.Марон, В.А.Юфин и другие. М., Недрa, 1979
 3. Лурье М.В., Табахов В.А. Особенности расчетов гидравлических режимов работы магистральных нефтепродуктопроводов с отводами М., ВНИИОЭНГ, РНТС Транспорт и хранения нефти и нефтепродуктов, 1982, №10.
 4. Лурье М.В., Табахов В.А. Проверка согласованности работы участков разветвленного нефтепродуктопровода при перекачке «из насоса в насос». М., ВНИИОЭНГ, РНТС Транспорт и хранения нефти и нефтепродуктов, 1983, № 9
 5. Абдуллаев А.А., Бланк В.В., Юфин В.А. Контроль в процессах транспорта и хранения нефтепродуктов. М.: Недрa, 1990.
 6. Ишмухаметов И.Т., Исаев С.Л., Лурье М.В., Макаров С.П. Трубопроводный транспорт нефтепродуктов. М., Нефть и газ, 1999.
 7. Чарный И.А. Неустойчивое движение реальной жидкости в трубах. М., Недрa, 1975.
 8. Гусейнзаде М.А., Юфин В.А. Неустойчивые движения нефти и газа в магистральных трубопроводах. М., Недрa, 1981.
 9. Агапкин В.М., Кривошеин Б.Л., Юфин В.А. Тепловой и гидравлический расчеты трубопроводов для нефти и нефтепродуктов. М.: Недрa, 1981
 10. Грачев В.В., Щербаков С.Г., Яковлев Е.И. Динамика трубопроводных систем. М.: Недрa, 1987
 11. Гидродинамические процессы в сложных трубопроводных системах М.А.Гусейнзаде, Л.И. Другина, О.Н.Петрова, М.Ф. Степанова, М., Недрa, 1991.
 12. Корелов М.А., Розенберг Г.Д. Нестационарные движения при последовательной перекачке вязких жидкостей в трубах. Изв. вузов Нефть и газ, 1979, № 3.
 13. Корелов М.А., Розенберг Г.Д. и др. Исследование нестационарных процессов течения однородных жидкостей на продуктопроводе Куйбышев-Брянск. Нефтяное хозяйство, 1978, № 5.

14. *Корелов М.А.* Об использовании численных методов при расчете нестационарных процессов при последовательной перекачке. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов М., ВНИИОЭНГ, 1978, №8.
15. *Корелов М.А.* К исследованию нестационарных процессов при последовательной перекачке нефтепродуктов. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. М., ВНИИОЭНГ, 1978, №9.
16. *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.
17. *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
18. *Юфин В.А., Мамедов А.И., Алиев Р.М., Аллахвердиев В.А.* Методика расчета нестационарных процессов в магистральных нефтепродуктопроводах при последовательной перекачке разнородных нефтепродуктов. Транспорт хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. М., ЦНИИТЭнефтихим, 1985, № 5.
19. *Мамедов А.И.* Методы расчета неустановившихся режимов работы сложных магистральных трубопроводов. М.: ВНИИОЭНГ, выпуск 1 (70), 1985.
20. *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.
21. *Кадымов Я.Б.* Переходные процессы в системах с распределенными параметрами. М.: Физматгиз, 1968.
22. *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 газопроводах и нефтепродуктопроводах с учетом реальных условий динамических режимов их работы. Изв.НАН Азербайджана серия физико-технических и математических наук, 2005, №3
23. *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.
24. *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.
25. *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.
26. *Пашаев А.М., Эфендиев О.З., Мамедов А.И., Азизов Р.Р.* Компьютерное моделирование динамических процессов в магистральных нефтепродуктопроводах при последовательной перекачке разнородных нефтепродуктов. Доклады НАН Азерб. 2007, № 1 .
27. *Белик Н.П.* К расчету волновых процессов в сложных трубопроводах при периодическом изменении расхода. Изв. Вузов Авиационная техника, 1967, № 4.
28. *Махин В.А., Присняков В.Ф., Белик Н.П.* Динамика жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1969.
29. *Колесников К.С. и др.* Динамика топливных систем ЖРД. М.: Машиностроение, 1975
30. *Чуян Р.К.* Методы математического моделирования двигателей летательных аппаратов М.: Машиностроение, 1988.
31. *Добровольский М.В.* Жидкостные ракетные двигатели. М.: 1995.
32. *Домотенко Н.Т., Кравец А.С., Никитин Г.А. и др.* Авиационные силовые установки. М.: Транспорт, 1975.

33. *Лухачев В.Я., Васин А.С., Гликман Б.Ф.* Техническая диагностика пневмогидравлических систем ЖРД. М.: Машиностроение, 1983.

MAGISTRAL NEFT MƏHSULLARI KƏMƏRLƏRİNDƏ NEFT MƏHSULLARI ARDICIL VURULARKƏN, KƏMƏRDƏ BAŞ VERƏN DINAMİK PROSESLƏRİN MODELLEŞDİRİLMƏSİ ÜÇÜN ƏDƏDİ ÜSUL

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

Məqalədə magistral neft məhsulları kəmərlərində iki neft məhsulu ardıcıl vurularkən, kəmərdə baş verən dinamik proseslərinin kompüterdə modelləşdirilməsi üçün yeni ədədi üsul təklif edilmişdir.

THE NUMERICAL METHOD OF SIMULATION OF TRANSIENTS PROCESSES OF THE CONSEQUENT TRANSFER CONDITIONS OF OIL PRODUCTION MAIN PRODUCT CONDUCTORS

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

The numerical method of simulation of transient processes of the consequent transfer conditions of oil production main product conductors.