

В. Г. Мусаев, д. т. н., доц.; Э. Б. Имамалиев, к. т. н., доц.; Н. Э. Гусейнов, к. т. н., доц.

ДИСКРЕТНЫЙ МЕТОД И СИСТЕМНО-СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ С ИЗМЕНЕНИЕМ ДАВЛЕНИЯ В НАЧАЛЕ И РАСХОДА В КОНЦЕ

В статье рассмотрено применение системно-структурного анализа совместно с дискретным методом при разработке технологических основ управления сложными магистральными трубопроводными системами. Совмещение дискретного и системно-структурного метода позволяет унифицировать задачи в сложных системах с распределенными параметрами с целью выработки единых схем анализа и расчета параметров потока.

Ключевые слова: системно-структурный анализ, дискретный метод, магистральный трубопровод, распределенный параметр, структурно-архитектурная модель.

Введение. Магистральные нефтепроводные системы в силу своих специфических технологических особенностей являются одним из ярких примеров систем с распределёнными параметрами, работающих в динамических режимах. Динамические процессы, происходящие в этих системах, описываются системами уравнений в частных производных.

Исследования показали, что магистральные нефтепроводы (МНП) относятся к сложным системам с распределенными параметрами. Они имеют достаточную длину с промежуточными источниками возмущений, являются разветвленными неоднородными системами. Так как источники первичной информации в этих системах находятся на значительных расстояниях друг от друга, то они представляют собой сложную систему с распределенными параметрами с распределенными базами данных [3].

В настоящее время методы системно-структурного анализа успешно используют для получения детальной и обобщенной информации об исследуемых процессах, разработке путей целенаправленного синтеза структуры сложных систем и методов нестационарных измерений [4, 5, 6]. Сегодня при решении задач для сложных систем с распределенными параметрами широко используется совмещение дискретного метода [1] и системно-структурного анализа [2] с целью получения детальной и обобщенной информации о состоянии исследуемых процессов, определения путей целенаправленного синтеза структуры системы и разработки методов нестационарных измерений. Решение задачи сводится к адаптации математических моделей к реальным условиям посредством идентификации параметров системы с целью выбора правильных решений.

Используемая схема анализа и расчета для нефтепроводных систем базируется на решении дифференциальных уравнений движения жидкости при соответствующих краевых условиях, которые позволяют вычислить стационарное, нестационарное давление и расход нефти. Однако этого недостаточно, так как не всегда можно провести детальный анализ происходящих физических процессов. Этот подход не позволяет решить такие задачи, как: коррекция и синтез систем с наперед заданными процессами формирования полей давления, а также некоторые задачи, связанные с управлением процессом, при котором необходимо определение постоянных коэффициентов, входящих в уравнение движения нефти [4].

Исходя из вышеизложенного, разработка обобщенной идеологии расчета и анализа поведения систем с распределенными параметрами, выработка технологии адаптации расчетных моделей к реальным условиям эксплуатации рассматриваемых систем безотносительно к геометрической и динамической топологии является актуальной

проблемой для исследования и анализа динамических процессов в магистральных трубопроводных системах.

Постановка задачи. В данной статье рассмотрено применение системно-структурного анализа [3] совместно с дискретным методом при разработке технологических основ управления сложными магистральными трубопроводными системами. Совмещение дискретного и системно-структурного методов позволяет унифицировать задачи в сложных системах с распределенными параметрами с целью выработки единых схем анализа и расчета параметров потока. При этом решение задачи динамики рассматривают как некоторую систему, представленную структурной схемой. Элементами структурной схемы являются математические операторы, устанавливающие правила преобразования некоторых воздействий на объект в порождаемую ими реакцию.

Данная проблема сводится к адаптации математических моделей к реальным условиям посредством идентификации параметров системы с целью выбора правильных решений, а также к решению ряда обратных и псевдообратных задач на основе разработанных нами расчетных архитектурных моделей управления.

Методы решения. В данной работе в качестве математического аппарата используют двухкратное и дискретное преобразование Лапласа. При переходе от изображения к оригиналу функций применяют рекуррентные соотношения [1].

Известно, что исследование динамических процессов в магистральном нефтепроводе сводится к решению уравнения движения и неразрывности при соответствующих начальных и краевых условиях [3].

Рабочий процесс в магистральном нефтепроводе с изменением давления в начале и расходом в конце трубы длиной ℓ , расположенной в декартовой системе координат вдоль оси абсцисс, описывают уравнениями движения и неразрывности вида [3]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial P(x,t)}{\partial x} = \kappa_1 \frac{\partial G(x,t)}{\partial t} + \kappa_3 G(x,t) \\ -\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = \kappa_2 \frac{\partial G(x,t)}{\partial x}, \end{cases} \quad (1)$$

при начальных и граничных условиях:

$$\begin{aligned} P(x,t)|_{x=0} &= P(0,t) = \varphi_1(t), \\ \frac{\partial P(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=\ell} &= \omega(x,t)_{x=\ell} = \varphi_2(t), \end{aligned}$$

где $P(x,t)$ – давление; $G(x,t)$ – расход; $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ – постоянные коэффициенты; $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ – функции времени.

При решении системы уравнений (1) операторным методом, используя двухкратное преобразование Лапласа, на первом этапе получим изображение для искомых функций $P(x,t)$ и $G(x,t)$. Затем с помощью обратного преобразования и применением дискретного преобразования Лапласа восстановим однократное изображение функций $P(x,t)$, $G(x,t)$.

Решение уравнений в частных производных, найденных с помощью двухкратного преобразования Лапласа, не зависит от последовательности применения прямого и обратного преобразований. Очевидно, что удачно выбранный порядок в двухкратном преобразовании может значительно облегчить решение задачи [1].

Решая задачу относительно $P(x,t)$ в области изображений, получим:

$$\bar{P}(x,s) = \frac{ch\gamma(l-x)}{ch\gamma l} \cdot \bar{\varphi}_1(s) + \frac{sh\gamma x}{\gamma ch\gamma l} \cdot \bar{\varphi}_2(s).$$

Представим полученное выражение в виде суммы двух давлений:

$$\bar{P}(x, s) = \bar{P}_1(x, s) + \bar{P}_2(x, s), \quad (2)$$

$$\text{где } \bar{P}_1(x, s) = \frac{ch \gamma (l - x)}{ch \gamma l} \cdot \bar{\varphi}_1(s), \quad \bar{P}_2(x, s) = \frac{sh \gamma x}{\gamma ch \gamma} \cdot \bar{\varphi}_2(s).$$

Здесь $\bar{\gamma}(s) = \sqrt{sk_2(k_3 + sk_1)}$ – коэффициент распространения волны.

Тогда из выражения (2) для $\bar{P}_1(x, s)$ в разных сечениях трубопровода получим:

$$\begin{aligned} \bar{p}_1(0, s) &= \bar{\varphi}_1(s), \\ \bar{p}_1(l, s) &= \bar{p}_1(0, s) \cdot \frac{1}{ch \gamma l}, \\ \bar{p}_1(x, s) &= \bar{p}_1(l, s) \cdot ch \gamma (l - x), \end{aligned} \quad (3)$$

градиент давления

$$\frac{\partial \bar{p}_1(x, s)}{\partial x} = -\gamma \cdot \bar{p}_1(x, s) \cdot th \gamma (l - x), \quad (4)$$

массовую скорость

$$\bar{G}_1(x, s) = -\frac{1}{b_1(s)} \cdot \frac{\partial \bar{p}_1(x, s)}{\partial x}, \quad (5)$$

где $b_1(s) = \sqrt{(sk_1 + k_3)/k_2}$ – волновое сопротивление трубопровода.

Аналогично для $\bar{P}_2(x, s)$ и $\bar{G}_2(x, s)$ получим:

$$\begin{aligned} \bar{p}_2(0, s) &= 0, \\ \bar{p}_2(x, s) &= \bar{p}_2(l, s) \frac{sh \gamma x}{sh \gamma l}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\bar{p}_2(l, s) = \frac{1}{\gamma} \cdot \bar{\varphi}_2(s) \cdot th \gamma l,$$

$$\frac{\partial \bar{p}_2(x, s)}{\partial x} = \gamma \cdot \bar{p}_2(x, s) \cdot th \gamma x, \quad (7)$$

$$\bar{G}_2(x, s) = \frac{1}{b_1(s)} \cdot \frac{\partial \bar{p}_2(x, s)}{\partial x}. \quad (8)$$

Выражения (2) – (8) позволяют составить структурную модель, характеризующую динамические процессы в исследуемой системе, в виде суммы двух давлений $\bar{P}_1(x, s)$ и $\bar{P}_2(x, s)$ (рис. 1).

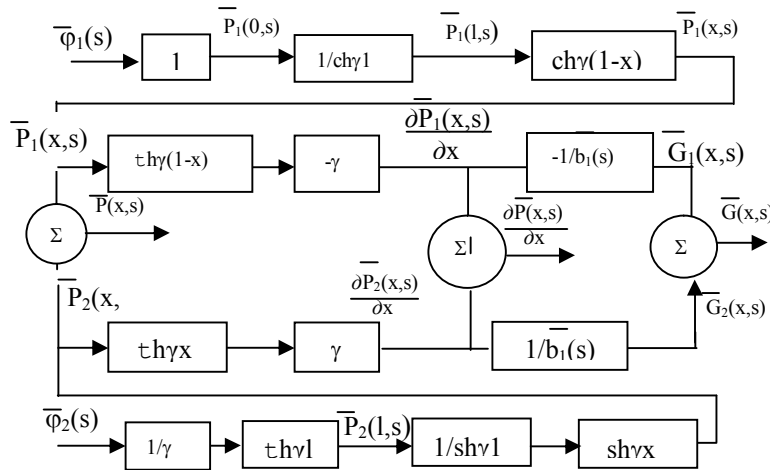
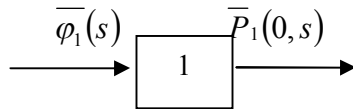


Рис. 1. Структурная модель движения жидкости в трубопроводе

Как видно из рис. 1, динамические процессы, происходящие в магистральных трубопроводах являются довольно сложными задачами в сложных системах с распределенными параметрами.

Рассмотрим решение задачи структурного анализа динамических процессов в МНП с известным изменением давления в начале и расхода в конце согласно структурной архитектурной модели (рис. 1) и на основе дискретного метода [1].

Согласно рис. 1 информативное звено структурной схемы, устанавливающее связь между $\bar{P}_1(0,s)$ и $\bar{\varphi}_1(s)$, можно представить как на рис. 2.


 Рис. 2. Звено структурной схемы, устанавливающее связь между $\bar{P}_1(0,s)$ и $\varphi_1(s)$

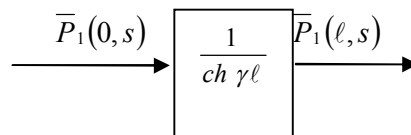
Согласно рис. 2 можно записать:

$$\bar{P}_1(0,s) = 1 \cdot \varphi_1(s). \quad (9)$$

Применяя дискретное преобразование и теорему свертки, уравнения (9) в области оригиналов можно представить как:

$$P_1[0,n] = \sum_{m=0}^n \varphi_1[m] \cdot 1[n-m] - \sum_{m=0}^{n-1} P_1[0,m] \cdot 1[n-m]. \quad (10)$$

Связь между $\bar{P}_1(1,s)$ и $\bar{P}_1(0,s)$ определяют операторной функцией звена, показанного на рис. 3.


 Рис. 3. Звено структурной схемы, устанавливающее связь между давлениями в точках $x=0$ и $x=\ell$

Согласно рис. 3 можно записать:

$$\bar{P}_1(1,s) = \frac{1}{ch \gamma \ell} \bar{P}_1(0,s) \quad (11)$$

или с учетом $ch\gamma\ell = \frac{1}{2}(\ell^{\gamma\ell} + \ell^{-\gamma\ell})$ уравнение (11) можно представить как:

$$\bar{P}(\ell, s) = \frac{2e^{-\gamma\ell}}{1 + e^{-2\gamma\ell}} \bar{P}_1(0, s). \quad (12)$$

Откуда согласно дискретному методу и теореме свертки, уравнение (12) в области оригиналов можно представить как:

$$P_1[\ell, n] = \frac{1}{1 + K_4[0]} \left(2 \sum_{m=0, 5\lambda}^n K'_5[m] P_1[0, n-m] - \sum_{m=\lambda}^n K'_4[n-m] P_1[\ell, m] - \sum_{m=0}^{n-1} P_1[\ell, m] \cdot 1[n-m] \right). \quad (13)$$

Связь между $\bar{P}_1(x, s)$ и $\bar{P}_2(\ell, s)$ определяют операторной функцией звена, показанного на рис. 4.

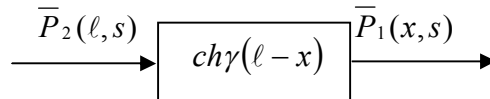


Рис. 4. Звено структурной схемы, устанавливающее связь между давлениями $\bar{P}_1(x, s)$ и $\bar{P}_2(\ell, s)$

Откуда согласно рис. 4 в операторной форме получим:

$$2 \bar{P}_1(x, s) \frac{1}{s} e^{-2\gamma\ell(0,5-\delta)} = \frac{1}{s} (1 + e^{-2\gamma\ell(1-\delta)}) \bar{P}_2(\ell, s). \quad (14)$$

Применяя дискретный метод и теорему свертки, получим:

$$P_2[\delta, n] = \frac{1}{2K_{11}[0]} \left(\sum_{m=0}^{n1} P_2[\ell, m] \cdot 1[n-m] + \sum_{m=\lambda(1-\delta)}^m K'_{11}[m] P_1[\ell, n-m] - 2 \sum_{m=\lambda(0,5-\delta)}^n K_{11}[n-m] P_1[\delta, m] \right), \quad (15)$$

где $K_{11}[n]$ и $K'_{11}[n]$ – оригиналы функций $\bar{K}_{11}(s)$ и $\bar{K}'_{11}(s)$, определяемые по таблице изображений [7].

$$K_{11}[n] = \begin{cases} 0, & \text{при } m < (0,5-\delta)\lambda \\ e^{-\alpha T} + \alpha T \sum_{m=(0,5-\delta)\lambda}^n e^{-\frac{\alpha m T}{\lambda}} I_0 \left(\frac{\alpha T}{\lambda} \sqrt{m^2 - [(0,5-\delta)\lambda]^2} \right) & \text{при } m > (0,5-\delta)\lambda, \end{cases}$$

$$K'_{11}[n] = \begin{cases} 0, & \text{при } n < (1-\delta)\lambda \\ e^{-\alpha T} + \alpha T \sum_{m=(1-\delta)\lambda}^n e^{-\frac{\alpha T m}{\lambda}} I_1 \left(\frac{\alpha_2 T}{\lambda} \sqrt{m^2 - [(1-\delta)\lambda]^2} \right) & \text{при } m > (1-\delta)\lambda. \end{cases}$$

Связь между градиентом $\text{grad} \bar{P}_1(x, s)$ и $P_1(x, s)$ согласно рис. 1 определяют операторной функцией звена, показанного на рис. 5.

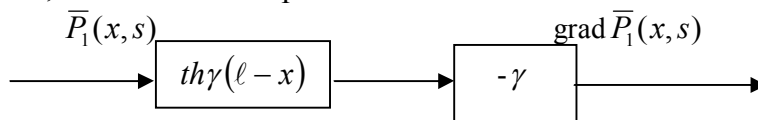


Рис. 5. Звено структурной схемы, устанавливающее связь между давлениями $\text{grad} \bar{P}_1(x, s)$ и $\bar{P}_1(x, s)$

Согласно рис. 5 $\text{grad} \bar{P}_1(x, s)$ в операторной форме определяют:

$$\text{grad } \bar{P}_1(x, s) = -\gamma \text{th}\gamma(\ell - x) \bar{P}_1(x, s), \quad (16)$$

откуда согласно теории дискретных систем и теореме свертки

$$\begin{aligned} \text{grad } P_1[\delta, n] = & \frac{1}{1 - K'_{11}[0]} \sum_{m=0}^n K_{14}[m] P_1[\delta, n] - \sum_{m=\lambda(1-\delta)}^n K'_{11}[n-m] \text{grad } P_1[\delta, m] - \\ & - \sum_{m=0}^{n-1} \text{grad } P_1[\delta, m] \cdot 1[n-m], \end{aligned} \quad (17)$$

где $K_{14}[n]$, $K_{15}[n]$ – соответственно оригиналы функций

$$\bar{K}_{14}(s) = \frac{1}{s} \sqrt{\frac{s + \alpha_2}{s}} \gamma, \quad \bar{K}_{15}(s) = \frac{1}{s} \sqrt{\frac{s + \alpha_2}{s}} e^{-2\gamma\ell(1-\delta)}, \quad \alpha_2 = \frac{\bar{K}_2}{\bar{K}_1},$$

$$K_{14}[n] = e^{-\frac{\alpha_2 n T}{2\lambda}} I_0\left(\frac{\alpha_2 n T}{2\lambda}\right) + \alpha_2 \sum_{m=0}^n e^{-\frac{\alpha_2 m T}{2\lambda}} I_0\left(\frac{\alpha_2 m T}{2\lambda}\right) \text{ при } m > 0.$$

Связь между $\bar{G}_1(x, s)$, $\text{grad } \bar{P}_1(x, s)$ определяют операторной функцией звена, показанного на рис. 6.

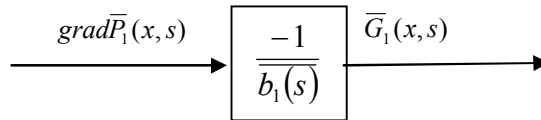


Рис. 6. Звено структурной схемы, устанавливающее связь между $\text{grad } \bar{P}_1(x, s)$ и $\bar{G}_1(x, s)$

Откуда из рис. 6 получим:

$$\bar{G}_1(x, s) = -\frac{1}{\bar{b}_1(s)} \text{grad } \bar{P}_1(x, s). \quad (18)$$

Уравнение (18) в области оригиналов можно представить следующим рекуррентным соотношением

$$G_1[\delta, n] = -\alpha_3 \sum_{m=0}^n K_3[m] \cdot \text{grad } P_1[\delta, n-m] - \sum_{m=0}^{n-1} G_1[\delta, m] \cdot 1[n-m], \quad (19)$$

где $K_3[n] = e^{-\alpha_2 \frac{nT}{\lambda}} I_0\left(\frac{\alpha_2}{2} n \frac{T}{\lambda}\right)$ – оригинал функции $\bar{K}_3(s) = \frac{1}{s} \sqrt{\frac{s}{s + \alpha_2}}$, определяемой по таблице изображений [7].

Аналогичным образом для второй ветки структурной схемы (рис. 1) можно получить рекуррентные соотношения, определяющие связь между $\bar{P}_2(1, s)$ и $\bar{\varphi}_2(s)$:

$$\begin{aligned} \varphi_2[n] = & \frac{1}{\alpha_1 (K_{14}[0] + K_{26}[0])} \left\{ \sum_{m=0}^n \varphi_2[m] 1[n-m] - \sum_{m=\lambda}^n K'_4[m] \varphi_2[n-m] - \alpha_1 \sum_{m=0}^{n-1} P_2[\ell, m] K_{14}[n-m] - \right. \\ & \left. - \alpha_1 \sum_{m=\lambda}^{n-1} K_{26}[n-m] P_2[\ell, m] \right\}, \end{aligned} \quad (20)$$

где $K_{26}[n]$ оригинал функции $\bar{K}_{26}(s) = \sqrt{\frac{s + \alpha_2}{s}} e^{-2\alpha_1 \sqrt{(s + \alpha_2)s}\ell}$, определяемой по таблице изображений [7].

$$K_{26}[n] = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 \leq m \leq \lambda \\ e^{-\alpha_n \frac{t}{\lambda}} I_0 \left(\frac{\alpha T}{\lambda} \sqrt{n^2 - \lambda^2} \right) + \alpha \sum_{m=\lambda}^n e^{-\alpha \frac{nT}{\lambda}} \cdot I_0 \left(\frac{\alpha T}{\lambda} \sqrt{m^2 + \lambda^2} \right), & \text{при } m > \lambda. \end{cases}$$

Между $\bar{P}_2(x, s)$ и $\bar{P}_2(\ell, s)$:

$$\begin{aligned} P_2[\ell, n] = & \sum_{m=\lambda(\delta-0,5)}^n K_{27}[m] P_2[\delta, n-m] + \sum_{m=\lambda(\delta-0,5)} K_{28}[m] P_2[\delta, n-m] + \\ & + \sum_{m=0,5\lambda\delta}^n K_{16}[m] P_2[\delta, -n-m] - \sum_{m=0}^{n-1} P_2[\ell, m] \cdot \mathbb{I}[n-m], \end{aligned} \quad (21)$$

где $K_{16}[n]$, $K_{27}[n]$, $K_{28}[m]$ – соответственно оригиналы функций

$$\bar{K}_{27}[s] = \frac{1}{s} e^{-\gamma(x-\ell)}, \quad \bar{K}_{28}[s] = \frac{1}{s} e^{-\gamma(\ell+x)}.$$

$$\begin{aligned} K_{16}[n] = & \begin{cases} 0, & \text{при } n < \delta\lambda \\ e^{-\frac{\alpha_2 n T}{2\lambda}} + \delta\lambda \sum_{m=\delta\lambda}^n e^{-\frac{\alpha_2 m T}{2\lambda}} \frac{I_1 \left(\frac{\alpha_2 T}{2\lambda} \sqrt{m^2 - (\delta\lambda)^2} \right)}{\sqrt{m^2 - (\delta\lambda)^2}}, & \text{при } m > \delta\lambda, \end{cases} \\ K_{27}[n] = & \begin{cases} 0, & \text{при } m < (\delta-0,5)\lambda \\ e^{-\alpha_2 T} + \alpha_2 T \sum_{m=(\delta-0,5)\lambda}^n e^{-\frac{\alpha_2 m T}{\lambda}} \frac{I_0 \left(\frac{\alpha_2 T}{\lambda} \sqrt{m^2 - [(\delta-0,5)\lambda]^2} \right)}{\sqrt{m^2 - [(\delta-0,5)\lambda]^2}}, & \text{при } m > (\delta-0,5)\lambda, \end{cases} \\ K_{28}[n] = & \begin{cases} 0, & \text{при } m < (0,5+\delta)\lambda \\ e^{-\alpha_2 T} + \alpha_2 T \sum_{m=(0,5+\delta)\lambda}^n e^{-\frac{\alpha_2 m T}{\lambda}} \frac{I_0 \left(\frac{\alpha_2 T}{\lambda} \sqrt{m^2 - [(0,5+\delta)\lambda]^2} \right)}{\sqrt{m^2 - [(0,5+\delta)\lambda]^2}}, & \text{при } m > (0,5+\delta)\lambda. \end{cases} \end{aligned}$$

Между $\text{grad} \bar{P}_2(x, s)$ и $\bar{P}_2(x, s)$:

$$\begin{aligned} \text{grad} P_2(\delta, n) = & \frac{1}{1 + K_{16}[0]} \left\{ -\alpha_1 \left(\sum_{m=0}^n K_5[m] P_2[\delta, n-m] - \sum_{m=\lambda\delta}^n K_{18}[m] P_2[n-m] \right) - \right. \\ & \left. - \sum_{m=0,5\lambda\delta}^n K_{16}[n-m] \text{grad} P_2[\delta, m] - \sum_{m=0}^{n-1} \text{grad} P_2[\delta, m] \cdot \mathbb{I}[n-m] \right\}, \end{aligned} \quad (22)$$

где $K_{16}[n]$, $K_{18}[n]$ – оригиналы функций $\bar{K}_{16}[s]$, $\bar{K}_{18}[s]$.

Связь между $\bar{G}_2(x, s)$ и $\text{grad} \bar{P}_2(x, s)$ выражается как:

$$G_2[\delta, n] = -\alpha_3 \sum_{m=0}^n K_3[m] \text{grad} P_2[\delta, n-m] - \sum_{m=0}^{n-1} G_2[\delta, m] \cdot \mathbb{I}[n-m]. \quad (23)$$

Полученные результаты. Для различных задач динамики согласно разработанной структурно-архитектурной модели магистрального трубопровода, показанного на рис. 1, в области оригиналов были найдены соответствующие рекуррентные соотношения, которые имеют довольно простой вид, состоящие только из сумм параметров, описывающих процессы, происходящие в магистральных трубопроводах.

Аналогично могут быть решены и другие наблюдаемые на практике технологические ситуации.

Полученные рекуррентные соотношения легко могут быть реализованы с помощью современных вычислительных средств, что является существенным при исследовании сложных динамических систем с распределенными параметрами.

Выводы. Построенные структурные архитектурные модели, как модель физического процесса, являются одним из удобных способов описания и анализа взаимосвязанных процессов. На основании структурных архитектурных моделей можно написать уравнения звена или группы звеньев, что позволяет установить связь между коэффициентами и переменными уравнений. Составленные таким образом структурные архитектурные модели позволяют визуализировать взаимодействия и преобразования давления и расхода, являются информативной математической моделью динамических процессов в магистральных нефтепроводных системах. В целом структурные архитектурные модели отображают непрерывные информации о состоянии объекта. При необходимости, перейдя в область оригиналов, можно получить приближенную или точную информацию на данный момент.

Таким образом, совмещение дискретного и системно-структурного методов позволяет унифицировать задачи в сложных системах с распределенными параметрами с целью выработки единых схем анализа и расчета параметров потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кадымов Я. Б. Переходные процессы в системах с распределенными параметрами / Кадымов Я. Б. – М.: Наука, 1968. – 192 с.
2. Шашков А. Г. Системно-структурный анализ процесса теплообмена и его применение / Шашков А. Г. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 280 с.
3. Мусаев В. Г. Сложные системы трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов / Мусаев В. Г. – Баку: Элм, 2004. – 301 с.
4. Мусаев В. Г. Дискретный метод и системно-структурного анализ при решении динамических задач в магистральных трубопроводных системах / В. Г. Мусаев // Вестник машиностроения. – 2007. – № 10. – С. 29 – 33.
5. Структурный анализ динамических процессов в магистральных нефтепроводах [Электронный ресурс] / Мусаев В. Г. // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – №1. – 2007. Режим доступа до журн.: http://www.ogbus.ru/authors/Musaev/Musaev_1.pdf.
6. Мамедов Г. А. Структурный анализ динамических процессов в системах с иерархической структурой управления / Г. А. Мамедов, К. Э. Рустамов, В. Г. Мусаев // Изв. НАН Азерб., серия физико-технических и математических наук, том XXVI. – 2006. – № 2. – С. 108 – 113.
7. Диткин В. А. Справочник по операционному исчислению / В. А. Диткин, А. П. Прудников. – М.: Высшая школа, 1965. – 465 с.

Мусаев Видади Гасан оглы – д. т. н., доц., заведующий кафедрой компьютерных систем и сетей, e-mail: musayev_vidadi@mail.ru.

Имамалиев Эльман Бахлул оглы – к. т. н., доцент кафедры компьютерных систем и сетей.

Гусейнов Натиغ Этибар оглы – к. т. н., доцент кафедры прикладной информатики. Азербайджанский технический университет.