На правах рукописи

Нгуен Данг Хоа

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ МАГИСТРАЛЬНЫМИ ТРУБОПРОВОДНЫМИ СИСТЕМАМИ

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт- Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Козлов Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Дегтярев Александр Борисович

кандидат физико-математических наук, доцент
Ануфриев Игорь Евгеньевич

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций

Защита состоится «31» мая 2012 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.10 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 21, 9 учебный корпус, ауд. 121.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Отзывы на автореферат в 2 экз., заверенные гербовой печатью, просьба присылать по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 21, 9 учебный корпус (факультет технической кибернетики), ауд. 525, ученому секретари совета Д 212.229.10.

Автореферат разослан « 28 » апреля 2012 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент Э.А. Кудряшов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время магистральные трубопроводные системы получили широкое распространение в различных областях экономики, в частности, в нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности. Поэтому задача повышения качества управления такими системами является важной задачей. Одним из наиболее эффективных путей решения этой задачи является совершенствование методов математического моделирования режимов трубопроводных сетей и моделей для управления стационарными и переходными режимами трубопроводных систем. Подход к решению этих задач требует разработки математических моделей трубопроводных сетей для численного анализа режимов и математического моделирования управляющих устройств, обеспечивающих заданные состояния вязких жидкостей в трубопроводных сетях.

Развитие трубопроводной транспортировки ставит ряд задач моделирования для управления сложными взаимосвязанными трубопроводными системами в стационарных, нестационарных, аварийных и нормальных режимах. Моделирование трубопроводных систем для транспортировки жидкостей должно осуществляться с учетом управления режимами перекачивающих насосных станций путем изменения структуры потоков жидкостей, использования внутрисистемных перемычек и закольцованных систем трубопроводов, изменения режима потребления и подачи жидкостей. Трудность моделирования для анализа и синтеза управлений такими системами обусловливается сложностью и вариантностью динамического описания течения вязких жидкостей в трубопроводах, а также необходимостью учета многих различных факторов.

Проблемам математического моделирования трубопроводных систем посвящен ряд работ в области нефтегазовой динамики, которым относятся исследования Х. Кросса, В.Я. Хасилева, А.П. Меренкова, М.Г. Сухарева и др.

Для решения задач анализа, синтеза и управления динамикой трубопроводных систем при применении современных методов управления необходимо иметь динамические характеристики течения жидкостей в магистральных трубопроводах. Математическое моделирование динамики магистральных трубопроводных систем позволяет рассчитывать эксплуатационные режимы функционирования таких трубопроводов, а также анализировать возможные аварийные и предаварийные ситуации, связанные с отклонением от нормальных режимов функционирования системы. Кроме того, математическое моделирование движения жидкостей или газов в трубопроводных системах необходимо для конструирования систем автоматического управления.

Необходимость учета сложных технологических режимов трубопроводных систем требует применения методов и моделей математического программирования. Технологические требования необходимо учитывать обеспечивать при моделировании, наличии технологических альтернатив для принятия управленческих решений в условиях эксплуатации трубопроводной системы.

Важнейшими задачами управления трубопроводными системами, решенными в диссертации, являются:

- разработка математических моделей для исследования стационарных состояний и переходных процессов трубопроводных сетей с учетом возмущений;

- разработка математических моделей для оптимизации стационарных состояний и приближенной оптимизации (субоптимизации) переходных режимов трубопроводных систем на основе численно-аналитических методов математического программирования.

Разработка указанных методов математического моделирования для решения этих задач необходима для повышения эффективности, надежности, безопасности эксплуатации и расширения функциональных возможностей трубопроводными систем.

Цель работы. Целями исследования являются:

- разработка математических моделей сложных трубопроводных систем на основе моделей стационарных режимов вязкой жидкости в трубопроводных сетях, соответствующих численных методов, методов для синтеза оптимальных управлений, а также программного обеспечения систем управления стационарными режимами трубопроводных систем;

- разработка математических моделей для описания динамики вязкой жидкости в трубопроводных сетях и субоптимального управления трубопроводными системами на основе разностных схем и методов управления для приближенной минимизации суммарных функционалов качества на основе прогнозирования давлений и расходов жидкости в узлах сетей.

Сложность технологических режимов трубопроводных систем приводит к необходимости создания математических моделей с учетом комплексных требований к их режимам, которые могут быть реализованы в значительной степени методами и моделями математического программирования. В связи с этим для достижения целей диссертационной работы решены следующие задачи:

1. Разработка математических моделей и методов описания стационарных режимов трубопроводных сетей для формализации задач управления и создания моделей математического программирования для

синтеза оптимальных управлений при ограниченных технических характеристиках режимов и ресурсов трубопроводных систем.

2. Разработка математических моделей и методов численного анализа переходных режимов сложных трубопроводных сетей с промежуточными насосными станциями, формализация задач управления для синтеза субоптимальных управлений на основе моделей математического программирования, включая методы анализа и определения давлений и расходов в узлах трубопроводных сетей.

3. Разработка моделей, численных методов и программного комплекса для анализа динамики и квазиоптимального управления трубопроводных систем в переходных режимах.

Решение этих задач позволяет разработать математические модели, численные методы и комплексы программ для использования в научных исследованиях и инженерной практике.

Объектами исследования являются математические модели оптимальных стационарных состояний и квазиоптимальных нестационарных режимов для вязких жидкостей, транспортируемых по магистральным трубопроводным системам.

Методы исследования включают математические методы теории дифференциальных уравнений в частных производных, методы гидромеханики, методы математического программирования, методы теории устойчивости динамических систем.

Основные результаты.

1. Разработаны математические модели стационарных состояний вязкой жидкости, численно-аналитические модели анализа потокораспределения жидкости в трубопроводных системах и операторы для вычисления оптимальных управлений на основе математического программирования для количественного и качественного исследования системы в целом, включая анализ условий реализуемости заданных стационарных режимов.

2. Разработаны математические модели для управления динамикой вязкой жидкостью в трубопроводных системах на основе уравнений Навье-Стокса, включающие разностные схемы и численно-аналитические методы квазиоптимального управления на основе математического программ-мирования для нестационарных режимов транспортировки вязкой жидкости по сложным гидравлическим сетям. Это позволяет создать обобщенные модели квазиоптимальной системы управления с учетом насосных станций, включая методы и модели для количественного и качественного анализа динамики управляемых системы.

3. Разработан программный комплекс для моделирования, анализа, синтеза и проектирования трубопроводных систем в стационарных и переходных режимах.

Научная новизна. Основные научные результаты, полученные в диссертации:

1. Математические модели стационарных и переходных режимов, разработанные на основе методов гидромеханики, а также модели и численно-аналитические методы вычисления управлений на основе математического программирования, позволяющие сформулировать модели замкнутых систем управления.

2. Разработанные математические модели позволяют исследовать реализуемость оптимальных стационарных и квазиоптимальных переходных режимов трубопроводных систем на основе достаточных критериев существования допустимых решений для алгебраических систем равенств и неравенств, задающих технологические требования к режимам объекта.

2. Разработанные математические модели формируют основу для качественного исследования стационарных и переходных режимов трубопроводных систем, включая устойчивость замкнутых систем управления трубопроводными системами.

Теоретическая ценность и практическая значимость. Теоретическая ценность работы состоит в разработке аналитических и численных методов математического моделирования, анализа и синтеза субоптимальных режимов управления стационарной и нестационарной транспортировкой вязкой жидкости по магистральным трубопроводам, а также разработанными моделями и методами оптимизации режимов работы сетей.

Практическая значимость диссертации состоит в разработке программного комплекса, позволяющего осуществлять проектирование, моделирование, анализ и управление трубопроводными системами в стационарных и переходных режимах.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математические модели для описания оптимального или субоптимального управления стационарной и нестационарной транспортировкой вязкой жидкости по сложным трубопроводным системам с учетом положений промежуточных насосных станций.

2. Комплекс моделей математического программирования на основе численно-аналитического для определения оптимальных и допустимых режимов работы трубопроводных систем в стационарных режимах.

3. Программный комплекс для проектирования, моделирования, анализа и синтеза трубопроводных систем в стационарных и переходных режимах.

Апробация работы. Основные практические и научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на I Международной научно-практической конференции «Научные и технические средства обеспечения энергосбережения и энергоэффективности в экономике РФ» (СПб, 20-21 апреля 2011 года), «Фундаментальные исследования в национальных исследовательских университетах» (2011 г. и 2012 г.).

Публикации. Основные результаты исследования опубликованы в четырех работах. Из них две публикации в журналах из перечня ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объём диссертации составляет 110 страниц машинописного текста, 1 таблиц, 14 рисунков, 2 приложения. Список литературы состоит из 165 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы, определяется объект исследования, формулируются цели и задачи исследования.

В первой главе диссертации приведен обзор и анализ наиболее важных работ по математическому моделированию процессов управления потоками жидкостей в магистральных трубопроводных системах. На основе анализа формулируется постановка задач математического моделирования и управления транспортировкой вязкой жидкости по магистральным трубопроводным системам в стационарных и переходных режимах.

Во второй главе описаны численно-аналитические методы решения задачи вычисления оптимального режима работы трубопроводных систем в стационарных режимах.

Магистральная трубопроводная система представляется с помощью графа, состоящего из M узлов, N линейных трубопроводов (рис. 1.б), содержащих с промежуточные насосные станции (см. рис. 1.б). Уравнения течения слабо сжимаемой вязкой жидкости $\rho \approx const$ в линейном участке трубопроводной системы как объекта исследования в координатах “давления-расходы” при наличии промежуточных насосных станций представляются совокупностью уравнений неразрывности и уравнениями, связывающими давления и скорости движения жидкости в трубе

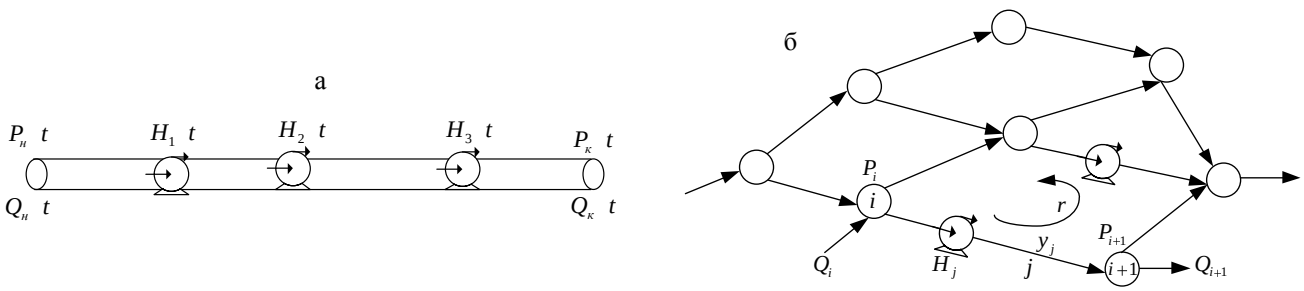

Рис. 1. Схема линейного трубопровода – «а»
и сети трубопроводов общего вида – «б».

$$\begin{cases} A_j \dfrac{\partial x_j}{\partial z_j} + \dfrac{\partial p_j}{\partial t} = 0, \\ \dfrac{\partial p_j}{\partial z_j} + B_j \dfrac{\partial x_j}{\partial t} + C_j x - \sum\limits_{k=1}^{K_j} H_{jk}\ t\ \delta\ z_j - z_{jk} = 0,\ j = 1,\ldots,N. \end{cases}, \qquad 1)$$

где: $p_j\ z_j, t$ – давление жидкости в j-м трубопроводе; $x_j\ z_j, t$ – массовой расход в j-м трубопроводе; $H_{jk}\ t$ – активное давление, создающееся k-й насосной стан-цией на j-м трубопроводе; z_{jk} – координата k-й насосной станцией на j-м трубопроводе; $\delta\ z$ – дельта функция Дирака, z – координата по длине трубопровода.

Из уравнений (1) следует система уравнений, описывающая распределение расходов и давлений трубопроводной системы в стационарных режимах

$$Ax = Q,\ By = 0,\ y + H = Rx,\ y = \bar{A}^T \bar{P},\ \sum\nolimits_{i=\overline{1,M}} Q_i = 0. \qquad (2)$$

где: $\bar{A}$ – полная матрица $M \times N$ соединений трубопроводной сети; A – матрица $M-1 \times N$, полученная из матрицы $\bar{A}$ удалением последнюю строку; B – матрица независимых контуров сетей; $y = y_1, y_2, \ldots, y_N\ ^T$ – вектор перепада давления на ветвях; $H\ t = H_1\ t, H_2\ t, \ldots, H_N\ t\ ^T$, $H_j\ t = \sum_{k=1}^{K_j} H_{jk}\ t$ – вектор суммы действующих давлений на ветвях; $R = diag\ R_1, R_2, \ldots, R_N$ – матрица $N \times N$ гидравлического сопротивления сети; $Q = Q_1, Q_2, \ldots, Q_M\ ^T$ – вектор расходов жидкости источников или потребителей в узлах; $P = P_1, P_2, \ldots, P_M\ ^T$ – вектор давления в узлах.

Закон гидравлического сопротивления в общем случае является нелинейной функцией от расходов. В работе рассматривается ламинарное течение жидкостей в трубопроводной системе, поэтому уравнения (2) являются системой линейных уравнений.

Задача вычисления оптимального режима работы исследуемой трубопроводной системы в стационарных режимах решается на основе следующих целевых функций

1) $F_1(H) = c^T H = \sum_{j=1}^{N} c_j H_j,$ (3.1)

2) $F_2(P) = d^T \left| P - P^0 \right| = \sum_{i=1}^{M} d_i \left| P_i - P_i^0 \right|,$ (3.2)

3) $F_3(H,P) = c^T H + d^T \left| P - P^0 \right| = \sum_{j=1}^{N} c_j H_j + \sum_{i=1}^{M} d_i \left| P_i - P_i^0 \right|,$ (3.3)

4) $F_4(P) = \left\| V - V^0 \right\|^2 = \sum_{j=1}^{N} x_j^{\ 2} + \sum_{j=1}^{N} H_j^{\ 2} + \sum_{i=1}^{M} P_i - P_i^0{}^{\ 2},$ (3.4)

где: $c_j,\ j = \overline{1,N}$ – удельные стоимости суммой энергии, затрачиваемой насосами на *j*-м трубопроводе трубопроводной сети.

Ограничения на технические характеристики насосных станций и давлений в узлах и пропускных способностей трубопроводов системы имеют вид

$$P_{\min} \le P \le P_{\max},\ 0 \le H \le H_{\max},\ x_{\min} \le x \le x_{\max}. \qquad (4)$$

Линеаризации целевых функций (3.2-3.3) сводит задачу к минимизации линейного функционала

$$F_3(\alpha,\beta) = c^T H + d^T \beta = \sum_{j=1}^{N} c_j H_j + \sum_{i=1}^{M} d_i \alpha_i \to \min \qquad (5)$$

при учете сформулированных ограничений. Математическая формулировка задачи линейного программирования для оптимального управления с линейными неравенствами (4) и целевой функцией (5) имеет вид

$$\begin{pmatrix} A & O_{M\times M} & O_{M\times N} & O_{M\times N} & O_{M\times M} & O_{M\times M} \\ R & -\bar{A}^T & -E_N & O_{M\times N} & O_{M\times M} & O_{M\times M} \\ O_{M\times N} & -E_M & O_{M\times N} & E_M & -E_M & O_{M\times M} \\ O_{M\times N} & E_M & O_{M\times N} & E_M & O_{M\times M} & -E_M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ P \\ H \\ \alpha \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q \\ O_{M+N+M\ \times 1} \\ -P^0 \\ P^0 \end{pmatrix} \qquad (6.1)$$

$$P_{\min} \le P \le P_{\max},\ 0 \le H \le H_{\max},\ x_{\min} \le x \le x_{\max},\ \alpha, \beta_1, \beta_2 \ge 0, \qquad (6.2)$$

$$F_3(\alpha,\beta) = c^T H + d^T \beta = \sum_{j=1}^{N} c_j H_j + \sum_{i=1}^{M} d_i \alpha_i \to \min \qquad (6.3)$$

где: O – обозначает нулевую матрицу; E – единичная матрица.

Задача (6.1) – (6.3) может быть решена стандартными методами (методом симплекса, методом проекции градиента, методом эллипсоида и др.).

Далее рассматривается случай, когда параллелепипед интервальных ограничений на переменных (6.2) аппроксимируется эллипсоидом

$$X - X^0 \;^T J \;\; X - X^0 \;\; \le r^2,\; rang \;\; J \;\; = \dim \;\; X \;\; . \qquad (7)$$

где: $X = \;\; x, P, H, \alpha, \beta_1, \beta_2 \;\;^T$; J – симметричная неотрицательно-определенная квадратная матрица.

Соотношения (6.1), (7) и (6.3) позволяют сформулировать задачу минимизации линейного функционала на компактных множествах, которая имеет вид

$$X^* = \arg\min_{X \in \square^n} \left\{ F = c^T X \left| \begin{array}{l} AX = b,\; A \in \square^{m \times n},\; rang \;\; A \;\; = m, \\ X^T X \le r^2. \end{array} \right. \right\} \qquad (8)$$

Для оптимизации системы с функционалом (3.4) можно получить следующую задачу минимизации

$$X^* = \arg\min_{X \in \square^n} \left\{ F = \;\; X - X^0 \;^T \;\; X - X^0 \left| \begin{array}{l} AX = b,\; A \in \square^{m \times n}, \\ rang \;\; A \;\; = m, \\ X^T X \le r^2. \end{array} \right. \right\} \qquad (9)$$

Для решения задач (8) и (9) используются необходимые условия оптимальности выпуклого программирования. Соотношения для определения решений задач (8) и (9) и достаточные условия совместности ограничений для существования решений приведены в табл. 1.

В табл. 1 использованы следующие определения множеств: $D^1 = \;\; X \left| AX = b \right.$; $D^2 = \;\; X \left| X^T X \le r^2 \right.$; $\operatorname{int} D$ – внутренность множества $D = D^1 \cap D^2$; $\tilde{b} = b^T \;\; AA^T \;\;^{-1} b$; $\tilde{P}^0 = E - A^T \;\; AA^T \;\;^{-1} A$ – оператор проектирования вектора на линейное подпространство; $P^A b = A^T \;\; AA^T \;\;^{-1} b$; $\alpha_1 = 4r^2 - 4\tilde{b}$; $\alpha_2 = c^T \tilde{P}^0 c$; $\beta_1 = r^2 - \tilde{b}$;

$\beta_2 = 2r^2 - 2\tilde{b}$; $\beta_3 = r^2 - \tilde{b} - X^{0T}\tilde{P}^0 X^0$. Параметр λ определяется из пары решения уравнения (10) или (11), выбирается значение, соответствующее минимуму функционала.

Таблица 1. Операторы решения задач оптимизации (8) и (9)

Задача	**Решение**	**Условия совместности**
Задача (8)	$X^* = -\frac{1}{2\lambda}\tilde{P}^0 c + P^A b$, $\alpha_1\lambda^2 - \alpha_2 = 0$. (10)	$\alpha_1\alpha_2 > 0$.
Задача (9)	$X^* = \begin{cases} X_0^* = \frac{1}{1+\lambda} P^0 X^0 + \lambda P^A b, & \text{if } X^* \notin \text{intD}; \\ X_1^* = P^0 X^0, & \text{if } X^* \in \text{intD}; \end{cases}$ $\beta_1\lambda^2 + \beta_2\lambda + \beta_3 = 0$. (11)	$\beta_2^2 - 4\beta_1\beta_3 > 0$.

Третья глава посвящена разработке математических моделей, разностных схем для системы дифференциальных уравнений в частных производных и численные методы решения задачи оптимального управления трубопроводными системами в переходных режимах.

Рассматривается задачи управления в переходных режимах для линейных трубопроводов с промежуточными насосными стациями (рис. 1.а) для обеспечения изменений давлений или расходов на концах линейных трубопроводов. Управления формируются как воздействия на трубопроводы с учетом технических ограничений характеристик насосов и допустимых пределов значений давлений в трубопроводах в противодействии гидравлическим ударам.

Математические модели для численного субоптимального управления трубопроводами сформулированы с использованием теории разностных схем для дифференциальных уравнений в частных производных. Для этого разделены непрерывные пространства трубопровода $[0;l]$ на конечные множества из M узлов $[0,\ \Delta z,\ 2\Delta z,\ ...,M\Delta z]$, и интервал времени $[0;T]$ на конечные моменты времени $[0,\ \Delta t,\ 2\Delta z,\ ...,N\Delta t]$, где Δz и Δt – длины координатных и временных подинтервалов. В результате непрерывные пространства заменяются сеточными пространствами с конечным числом узлов. В области $z \in 0;l$, $t \geq 0$ система дифференциальных уравнений, описывающих течения вязкой жидкости в

линейном трубопроводе с промежуточные насосными стациями, аппроксимируется с помощью неявной двухслойной разностной схемы

$$A\frac{x^{m+1,n+1}-x^{m-1,n+1}}{2\Delta z}+\frac{p^{m,n+1}-p^{m,n}}{\Delta t}=0, \tag{12}$$

$$\frac{p^{m+1,n+1}-p^{m-1,n+1}}{2\Delta z}+B\frac{x^{m,n+1}-x^{m,n}}{\Delta t}+Cx^{m,n+1}-\sum_{k=1}^{K}H_k^n\Theta\ \ m,z_k\ \ =0, \tag{13}$$

где: $\Theta\ \ m,z_k\ \ =1$ при $z_k=m\Delta z,$ в обратном случае $\Theta\ \ m,z_k\ \ =0.$

Использование (12) – (13) позволяет формулировать задачи оптимального управления трубопроводом для обеспечения изменений заданных расходов и давлений в трубопроводах в момент времени T следующим образом:

$$A\frac{x^{m+1,n+1}-x^{m-1,n+1}}{2\Delta z}+\frac{p^{m,n+1}-p^{m,n}}{\Delta t}=0, \tag{14}$$

$$\frac{p^{m+1,n+1}-p^{m,n+1}}{\Delta z}+B\frac{x^{m,n+1}-x^{m,n}}{\Delta t}+Cx^{m,n+1}-\sum_{k=1}^{K}H_k^n\Theta\ \ m,z_k\ \ =0, \tag{15}$$

$$x^{m,0}=x^0=const,\ p^{m,0}=\widehat{p}^m, \tag{16}$$

$$\underline{p}^{вхп}\le p^{0,n}\le\overline{p}^{вхп},\ \underline{p}^{выхп}\le p^{M,n}\le\overline{p}^{выхп},\ \underline{H}_k^n\le H_k^n\le\overline{H}_k^n, \tag{17}$$

$$k=\overline{1,K};\ m=\overline{0,M};\ n=\overline{0,N}\ .$$

$$\begin{aligned}J\ \ u\ \ &=\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=0}^{M}\ \ x^{m,N}-x_T^m\ \ ^2+\sum_{m=0}^{M}\ \ p^{m,N}-p_T^m\ \ ^2+\\&+\sum_{n=1}^{N}\ \ p^{0,n}\ \ ^2+\ \ p^{M,n}\ \ ^2+\sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{K}\ \ H_k^n\ \ ^2\to\min\end{aligned} \tag{18}$$

где: x^0, $p^{m,0}$ – начальные расход и давления в трубопроводе; x_T^m – заданный расход в трубопроводе в момент времени T; $\underline{p}^{вхп}$, $\overline{p}^{вхп}$, $\underline{H}_k^n$, $\overline{H}_k^n$ – соответственно, нижние и верхние значений давления в концах трубопровода и насосов; $u=\ \ p^{0,n},p^{M,n},H_k^n\ \ ^T,n=\overline{0,N}$ – управляющие давления насосов в концах трубопровода и промежуточных насосных станций.

Далее приведена формулировка задачи субоптимального управления трубопроводными системами для перевода системы из одного режима работы в новый режим при изменении заданных расходов и давлений у потребителей.

$$A_j \frac{x_j^{m_j+1,n+1} - x_j^{m_j-1,n+1}}{2\Delta z} + \frac{p_j^{m_j,n+1} - p_j^{m_j,n}}{\Delta t} = 0, \tag{19}$$

$$\frac{p_j^{m_j+1,n+1} - p_j^{m_j-1,n+1}}{2\Delta z} + B_j \frac{x_j^{m_j,n+1} - x_j^{m_j,n}}{\Delta t} + C_j x_j^{m_j,n+1} - \\ -\sum_{k=1}^{K_j} H_{jk}^n \Theta\ \ m_j, z_{jk}\ \ = 0, \tag{20}$$

$$\sum_{j \in C_i^{вых}} x_j^{M_j,0} + \sum_{k \in C_i^{вх}} x_k^{0,0} = Q_i\ \ 0 \tag{21}$$

$$p_j^{M_j,n} = p_k^{M_k,n}, \tag{22}$$

$$x_j^{m_j,0} = x_j^0 = const,\ p_j^{m_j,0} = \widehat{p}_j^{m_j}, x_j^{m_j,0} = x_j^0 = const, \tag{23}$$

$$\underline{p}_j^{вхп} \le p_j^{0,n} \le \overline{p}_j^{вхп},\ \underline{p}_j^{выхп} \le p_j^{M_j,n} \le \overline{p}_j^{выхп},\ \underline{H}_{jk}^n \le H_{jk}^n \le \overline{H}_{jk}^n, \tag{25}$$

$$i = \overline{1,M};\ j = \overline{1,N};\ k = \overline{1,K_j};\ m_j = \overline{0,M_j}; n = \overline{0,N_T}.$$

$$J\ \ u\ \ = \sum_{j=1}^{N}\sum_{n=1}^{N_T}\sum_{m_j=1}^{M_j} \ x_j^{m_j,N_T} - x_T^m\ \ ^2 + \ \ p_j^{m_j,N_T} - p_T^m\ \ ^2 + \\ +\sum_{j=1}^{N}\sum_{n=1}^{N_T} \ \ p_j^{0,n}\ \ ^2 + \ \ p_j^{M,n}\ \ ^2 \ \ +\sum_{j=1}^{N}\sum_{n=1}^{N_T}\sum_{k=1}^{K_j} \ H_{jk}^n\ \ ^2 \to \min \tag{26}$$

Оптимальные задачи (14) – (18) и (19) – (26) можно приводить к форме

$$AX = b, \tag{27}$$

$$\underline{X} \le X \le \overline{X}, \tag{28}$$

$$J\ \ X\ \ = X^T HX + f^T X \to \min. \tag{29}$$

Параллелепипед интервальных ограничений на переменные (28) задачи квадратичного программирования (27) – (29) аппроксимируется эллипсоидом. В результате данной аппроксимации исходная задача оптимального управления преобразуется к задаче субоптимальной оптимизации в форме (10), которую можно решить на основании разработанных алгоритмов.

Четвертая глава посвящена реализация программного комплекса, позволяющегося проектировать трубопроводные системы, решение

поставленных задач. Дается краткое описание структурных элементов программного комплекса. Основные инструменты разработки программного комплекса разрабатывались на языке программирования C# и некоторые модули комплекса в среде Matlab.

Приводятся примеры организации разработки системы управления потоками жидкостей, анализа и расчета переходных процессов для конкретных трубопроводных систем. Приводятся примеры и решения задачи отыскания энергетически оптимального режима системы работы в стационарных режимах.

Заключение. В диссертации получены следующие основные научные результаты:

1. Математические модели стационарных состояний вязкой жидкости, численно-аналитические модели анализа потокораспределения жидкости в трубопроводных системах и вычисления оптимальных управлений на основе математического программирования для количественного и качественного исследования системы в целом, включая анализ условий реализуемости заданных стационарных режимов.

2. Математические модели динамики вязкой жидкости в трубопроводных системах на основе уравнений Навье-Стокса, предложены разностные схемы и численно-аналитические методы квазиоптимального управления на основе математического программмирования для нестационарных режимов транспортировки вязкой жидкости по сложным структурам гидравлических сетей. Это позволяет создать обобщенные модели квазиоптимальной системы управления с учетом насосных станций, включая методы и модели для количественного и качественного анализа динамики управляемых системы.

3. Программный комплекс для моделирования, анализа, синтеза и проектирования трубопроводных систем в стационарных и переходных режимах с использованием языка программирования C# и среды Матлаб.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Козлов, В.Н., Нгуен Д.Х., Фирсов А.Н. Математическое моделирование и оптимизация гидравлических сетей при установившихся режимах транспортировки слабо сжимаемой жидкости [Текст] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2011. № 4. С. 42–46.

2. Козлов, В.Н., Нгуен Д.Х., Фирсов А.Н. Решение задачи об управлении нестационарной транспортировкой вязкой жидкости по системе трубопроводов [Текст] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2011. № 6.1 – К 35-летию образования факультета технической кибернетики. С. 190–195.

3. Козлов, В.Н., Нгуен Д.Х., Фирсов А.Н. Математическое моделирование и оптимизация гидравлических сетей при установившихся режимах несжимаемой жидкости [Текст] // Приложение в монографии В.Н. Козлова. Управление энергетическими системами и объединениями. СПбГПУ. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2011. С. 469–478.

4. Козлов, В.Н., Нгуен Д.Х., Фирсов А.Н. Решение задачи об управлении нестационарной транспортировкой углеводородов по системе трубопроводов [Текст] // Научные и технические средства обеспечения энергосбережения и энергоэффективности в экономике РФ. Сборник научных трудов 1-й международной научно-практической конференции – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2011. С. 83–85.