УДК 681

О.П. СТАШИНСЬКИЙ

Національний авіаційний університет, Київ

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОТИ ГАЗОПРОВОДУ ПРИ РОЗРОБЦІ ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСУ ОПЕРАТИВНИХ ДІЙ

В статті розглядається процес математичного моделювання потоку газу в однонитковому магістральному трубопроводі в умовах нестаціонарного режиму його роботи. Представлено математичну модель, яка лежить в основі системи диференціальних рівнянь з частинними похідними, що відображають основні фізичні закони які мають місце при нестаціонарних процесах роботи газопроводів. Даний метод покладений в основу створення комп'ютерного тренажерного комплексу оперативних дій для диспетчерського персоналу газотранспортного підприємства. Наголошується, що вибір правильної моделі і розробка на її основі програмних засобів підвищує ефективність використання тренажерного комплексу, сприяє формуванню практичних навичок, підвищенню професійного рівня і упевненості спеціалістів.

Ключові слова: *комп'ютерний тренажерний комплекс, магістральний газопровід, газовий потік, нестаціонарний процес, функція, математична модель.*

Вступ

Попередження аварійних ситуацій і ефективне управління промисловими трубопровідними системами є актуальним завданням стійкого розвитку промисловості в новому столітті. У світлі поставлених проблем якісне навчання фахівців трубопровідного транспорту навичкам оптимальної і безаварійної експлуатації трубопровідних систем служить одним з найбільш важливих інструментів підвищення промислової безпеки енергетичних об'єктів і зниження витрат на їх функціонування. Швидкий і ефективний процес навчання може бути здійснений на базі широкого використання комп'ютерних тренажерних комплексів (КТК). Ядром автоматизованого КТК має бути імітаційна модель, в основі якої лежить набір математичних схем, що дозволяють імітувати технологічні процеси в умовах стаціонарного і нестаціонарного режимів функціонування трубопровідних систем, а також в штатних, нештатних і аварійних ситуаціях в газотранспортній системі (ГТС).

Аналіз проведених досліджень. В сучасній навчальній практиці комп'ютерні тренажери стають все більш розповсюдженими і більш доступними засобами для професійної підготовки спеціалістів різного рівня кваліфікації [1]. Широкі мультимедійні можливості в поєднанні з відносно низькими фінансовими затратами роблять цей напрямок досить привабливим як для підприємств так і для технічних університетів. Розробка комп'ютерних тренажерів з використанням мультимедійних технологій дає можливість реалізувати різні по складності експерименти з обладнанням та відтворити методики обробки різного роду нештатних ситуацій. Використання мультимедійних технологій і сценарних моделей представлення знань предметної області, дозволяє запропонувати рішення для проектування і створення ефективних тренажерних комплексів, які володіють рядом інтелектуальних функцій і засновані на моделях поведінки і сприйняття користувача.

Постановка задачі. Одним з базових об'єктів ГТС є однонитковий газопровід. Тому математичне моделювання трубопровідних систем, які необхідно реалізувати в розрахункових ядрах КТК, доцільно починати з розгляду моделювання транспортування газу по однониткових газопроводах в умовах стаціонарного та нестаціонарного режимах роботи. В якості об'єкта моделювання в даній статті представлено однонитковий трубопровід з круглим поперечним перерізом з абсолютно жорсткими теплопровідними стінками в умовах неізотермічного потоку однокомпонентного газу при нестаціонарному процесі [2].

Моделювання потоку газу в однонитковому газопроводі

Нестаціонарні процеси в газопроводі, обумовлені зміною одного режиму транспортування газу іншим. В таких процесах газодинамічні параметри потоку в кожному перерізі трубопроводу x не залишаються постійними величинами, а залежать від часу t. Оскільки газ являє собою суттєво стисливе середовище, щільність якої залежить як від тиску, так і від температури, то для опису нестаціонарних процесів потоку газу потрібно використовувати не тільки закони збереження маси і кількості руху, але також закони перетворення енергії. Нестаціонарні процеси потоку газу в газопроводах описуються системою трьох диференціальних рівнянь з частинними похідними, що відображають основні закони фізики [3]. Така система складається з рівняння нерозривності (закон збереження маси); рівняння руху - (закон зміни кількості руху; 2-й закон Ньютона) і рівняння притоку тепла (наслідок загального закону збереження енергії і закону про зміну кінетичної енергії системи матеріальних точок):

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial\rho v}{\partial x}=0, \qquad (1)$$

$$\frac{\partial\rho v}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(p+\rho v^2)=-\lambda(\mathrm{Re},k)\frac{1}{d}\frac{\rho v^2}{2}, \qquad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e_{\text{внут.}})+\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(e_{\text{внут.}}+\frac{p}{\rho}\right)\cdot\rho v\right]=\frac{4}{d}\cdot\Theta_n, \qquad (3)$$

де ρ - густина газу; λ (Re, k) - коефіцієнт гідравлічного опору; $e_{внут}$ (T) - внутрішня енергія одиниці маси газу; $\Theta_п$ - потік тепла, що передається через одиницю площі поверхні в одиницю часу.

Дана система рівнянь дозволяє знайти три невідомі функції: тиск газу p (x, t), швидкість потоку газу v (x, t) і температуру газу T (x, t), що залежать від відстані на ділянці газопроводу x і часу t [4]. Зазвичай цю систему замикають алгебраїчними співвідношеннями:

$$\rho=\frac{p}{zRT}, \qquad (4)$$

$$e_{\text{внут.}}=C_v T+\text{const.}, \qquad (5)$$

$$J=e_{\text{внут.}}+p/\rho=C_p T+\text{const.}, \qquad (6)$$

$$\Theta_n=-\alpha\cdot(T-T_{\text{гр}}), \qquad (7)$$

де z (p, T) - коефіцієнт стисливості газу; J (T) - ентальпія одиниці маси газу; α - коефіцієнт теплопередачі; $T_{гр}$ - температура зовнішнього середовища; C_v, C_p - теплоємність газу.

Із системи рівнянь (1-3) випливає, що невеликі коливання параметрів газу поширюються уздовж осі трубопроводу з деякою швидкістю c, так званою адіабатичною швидкістю звуку [4]. Для цієї швидкості справедлива формула:

$$c=\sqrt{\gamma\cdot zRT}, \qquad (8)$$

де $\gamma = C_p/C_v$ - показник адіабати (для метану γ = 1,31), коефіцієнт стисливості z вважається постійним (для ідеальних газів z = 1). Швидкість $c \approx 400 \div 420$ м / с.

Якщо швидкість v течії газу мала в порівнянні зі швидкістю звуку c (тобто число Маха *v/c* <<1), якщо можна знехтувати впливом коливань температури на параметри газу, то система рівнянь (1-3) спрощується:

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\rho_{\text{ст}}\cdot c^2\cdot\frac{\partial q_{\text{к}}}{\partial x}=0, \qquad (9)$$

$$\rho_{\text{ст}}\frac{\partial q_{\text{к}}}{\partial t}+\frac{\partial p}{\partial x}=-\frac{\lambda c^2\rho_{\text{ст}}{}^2}{2\lambda d}\cdot\frac{q_k{}^2}{p}, \qquad (10)$$

де $q_к(x,t)=M/S=\rho(x,t)\cdot v(x,t)/\rho_{ст}$ - масова швидкість газу (м /c), яка являє собою питому (тобто розраховану на одиницю площі перетину трубопроводу) масову витрату газу, виражену в стандартних куб. м.: $M=\rho_{ст}\cdot q_к\cdot S$. Система рівнянь (9,10) містить дві невідомі функції: p (x, t) і q (x, t).

Для магістральних газопроводів великої протяжності в рівняннях (9,10) нехтують інерцією:

$$\rho_{\text{ст}}\frac{\partial q_{\text{к}}}{\partial t}<<\frac{\partial p}{\partial x}, \qquad (11)$$

і вважають, що рушійна сила - градієнт тиску - врівноважується тільки силою тертя газу об внутрішню поверхню трубопроводу.

$$\frac{\partial p}{\partial x}=-\frac{\lambda c^2\rho_{\text{ст}}{}^2}{2\lambda d}\cdot\frac{q_{\text{к}}{}^2}{p}, \qquad (12)$$

В такому випадку систему рівнянь (9,10) зводять до одного рівняння типу теплопровідності:

$$\frac{\partial p^2(x,t)}{\partial t}=a^2\cdot\frac{\partial^2 p^2(x,t)}{\partial x^2}, \qquad (13)$$

для функції $p^2(x,t)$, або

$$\frac{\partial q_{\text{к}}{}^2(x,t)}{\partial t}=a^2\cdot\frac{\partial^2 q_{\text{к}}{}^2(x,t)}{\partial x^2}, \qquad (14)$$

для функції $q_к{}^2(x,t)$. В цих рівняннях:

$$q_{\text{к}}{}^2=-\frac{\gamma d}{\lambda c^2\rho_{\text{ст}}{}^2}\cdot\frac{\partial p^2}{\partial x}, \qquad (15)$$

коефіцієнт a^2 (м²/с) визначається формулою:

$$a^2=\frac{c^2 d}{\gamma\lambda\cdot v_{\text{ср}}}, \qquad (16)$$

де $v_{ср}$ - середнє значення швидкості газу в нестаціонарному процесі, що розглядається.

Рівняння (13) або (14) розв’язують в сукупності із початковими (при t = 0) і граничними (при x = 0 і x = L) умовами, які відображають початковий стан газу на ділянці ($0 \le x \le L$) газопроводу та роботу об’єктів, які розташовані на лівому (x = 0) і правому (x = L) кінцях ділянки.

Якщо, наприклад, в початковий момент часу в газопроводі існував стаціонарний режим перекачування з тисками $p_п$ в перерізі x=0 та $p_к$ в перерізі x=L, то початкові умови можна прийняти у вигляді:

$$p^2(x,0)=p_{\text{п}}{}^2-\frac{p_{\text{п}}{}^2-p_{\text{к}}{}^2}{L}\cdot x, \text{ – для рівняння (13);}$$

$$q_{\text{к}}{}^2(x,0)=p_{\text{п}}{}^2\cdot\frac{\gamma d}{\lambda c^2\rho_{\text{ст}}{}^2}=\text{const.}, \text{ – для рівняння (14).}$$

В якості граничних умов можна задавати тиск і витрату газу у вигляді функцій від часу, або алгебраїчні зв’язки між тисками і витратою газу, що моделюють об’єкти які встановлені на кінцях газопроводу:

$$x = 0: \quad \varepsilon = \frac{p_н(0,t)}{p_в} = \Phi\left[q_к(0,t)\right].$$

$$x = L: \quad p_к(L,t) = f_1(t) \text{ або } q_к(L,t) = f_2(t).$$

Для коректного задання граничних умов їх загальна кількість на обох кінцях розглянутої ділянки трубопроводу має дорівнювати чотирьом [2]. В якості таких умов можуть задаватись граничні умови, що моделюють повний розрив трубопроводу та/або його повне перекриття (робота лінійного крану).

Висновок

Одним із головних завдань, при створенні КТК, що в результаті визначає його ефективність, являється представлення навчальної інформації у вигляді образів адекватних реальним об'єктам і з врахуванням індивідуальних особливостей механізмів сприйняття користувача. Базуючись на цих принципах, найважливішою задачею яка виникає при проектуванні тренажера є вибір правильної моделі і розробка на її основі програмних засобів конкретизації образних поглядів на тему обмеженого світу задачі (з метою розбудити уяву користувача) і генерації деяких індивідуальних фонових образів для активізації механізмів підсвідомості, підвищення граничного рівня уваги, сприймання і запам'ятовування. Таким чином тренажер являється джерелом нових знань про поведінку людини в умовах віртуального по формі та штучного по змістовним законах світу.

Література

1. *Селезнев В.Е. Современные компьютерные тренажеры в трубопроводном транспорте: математические методы моделирования и практическое применение / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, С.Н. Прялов; под ред. В.Е. Селезнева. – М.: МАКС Пресс, 2007. – 200 с.*

2. *Селезнев В.Е. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, С.Н. Прялов; под ред. В.Е. Селезнева. – М.: МАКС Пресс, 2009. – 436 с.*

3. *Лурье М.В. Задачник по трубопроводному транспорту нефти нефтепродуктов и газа: Учеб. пособие для вузов / М.В. Лурье. – М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2003. – 349 с.*

4. *Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта углеводородов / М.В. Лурье. – М.: ГУП "Нефть и газ" РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002.*

Надійшла до редакції 12.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедри інформаційних технологій В.П. Квасніков, Національний авіаційний університет, Київ.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ГАЗОПРОВОДА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА ОПЕРАТИВНЫХ ДЕЙСТВИЙ

А.П. Сташинский

В статье рассматривается процесс математического моделирования потока газа в однониточном магистральном трубопроводе в условиях нестационарного режима его работы. Представлена математическая модель, которая лежит в основе системы дифференциальных уравнений в частных производных, отражающие основные физические законы которые имеют место при нестационарных процессах работы газопроводов. Данный метод положен в основу создания компьютерного тренажерного комплекса оперативных действий для диспетчерского персонала газотранспортного предприятия. Отмечается, что выбор правильной модели и разработка на ее основе программных средств повышает эффективность использования тренажерного комплекса, способствует формированию практических навыков, повышению профессионального уровня и уверенности специалистов.

Ключевые слова: компьютерный тренажерный комплекс, магистральный газопровод, газовый поток, нестационарный процесс, функция, математическая модель.

MATHEMATICAL MODEL OF WORK OF GAS PIPELINE WHILE DEVELOPMENT OF TRAINER COMPLEX OF OPERATIVE ACTIONS

O.P. Stashynsky

This article discusses the process of mathematical modeling of gas in a main pipeline at a unsteady process. A mathematical model, which consists of the system of differential equalizations with the derivatives, which show basic physical laws at a unsteady process, is presented. This method is basis of creation of computer trainer complex of operative actions for controller's personnel of gas-transport enterprise. It is marked that the choice of correct mathematical model and development on its basis of programmatic facilities promotes efficiency of drawing on a computer trainer complex, forms practical skills promotes a professional level and confidence of specialists.

Key words: computer trainer complex, main gas pipeline, gas flow, unsteady process, the function, a mathematical model.

Сташинський Олександр Петрович – аспірант Національного авіаційного університету, Київ.