

Инженерное оборудование зданий и сооружений

УДК 622.692.4

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОПРОВОДАХ

В.И. Панферов, А.А. Февралёв

NUMERICAL SIMULATION OF THE TRANSITIONAL PROCESSES IN THE GAS PIPELINES

V.I. Panferov, A.A. Fevralev

Разработана численная модель течения газа с дозвуковой скоростью по трубопроводам. Создан программный комплекс, позволяющий исследовать переходные процессы в газопроводах, обусловленные различными эксплуатационными ситуациями в системах газоснабжения, в частности, явление газодинамического удара.

Ключевые слова: конечно-разностная схема; газопровод; изменение давления; программная реализация.

The numerical model of the gas flow with subsonic speed in the pipelines was developed. The special program was created, which makes it possible to investigate transient processes in the gas pipelines, the caused by different operational situations in the systems gas supplies, in particular, the phenomenon of the dynamical gas impact.

Keywords: finite-difference diagram; gas pipeline; change in the pressure; program realization.

Данное исследование является продолжением работы [1], в которой рассматривались переходные процессы, возникающие в газопроводах при конкретных эксплуатационных ситуациях. Методом Фурье были решены аналитически основные дифференциальные уравнения, описывающие процесс, но только для некоторых предельных случаев. Решение данных уравнений для наиболее общей ситуации возможно только численными методами, данная задача рассматривается в настоящей работе.

Известно [1–6], что нестационарное движение газа с дозвуковой скоростью в длинных трубопроводах может быть описано следующей системой дифференциальных уравнений в частных производных.

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\lambda\rho\omega^2}{2d}, & 0 < x < L, t > 0; \\ \frac{\partial P}{\partial t} = c^2 \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial x}, & 0 < x < L, t > 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $P(x,t)$, $\rho(x,t)$, $w(x,t)$ – соответственно давление, плотность и скорость течения газа в точке x по длине газопровода в момент времени t ; λ – коэффициент гидравлического трения; d – внут-

ренний диаметр газопровода; c – скорость звука в газе; L – длина рассматриваемого участка газопровода.

К системе (1) следует добавить уравнение состояния реального газа, которое представляется уравнением Клапейрона с поправочным коэффициентом [7].

Движение газа считается изотермическим, так как постоянная времени тепловых переходных процессов в десятки раз больше постоянной времени гидравлических процессов.

Таким образом, получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\lambda}{2d} \frac{ZRT}{P} (\rho\omega)^2; \\ \frac{\partial P}{\partial t} = c^2 \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial x}, \end{cases} \quad (2)$$

где Z – поправочный коэффициент для реального газа; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура газа.

Введем дополнительную переменную $Q = \rho\omega$, физический смысл данной переменной – это массовый расход газа, приходящийся на единицу площади поперечного сечения.

Тогда систему (2) запишем следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial P(x,t)}{\partial x} = \frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} + \frac{\lambda}{2d} \frac{gRT}{P(x,t)} Q(x,t)^2; \\ \frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = c^2 \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x}. \end{cases} \quad (3)$$

При моделировании учитывалось, что коэффициент λ величина не постоянная, а зависит от скорости движения потока (Re – число Рейнольдса). Использовались следующие формулы, рекомендуемые [8] для определения коэффициента трения:

- 1) при $Re < 2000$ $\lambda = 64 / Re$;
- 2) при $2000 < Re < 4000$ $\lambda = 0,0025 \sqrt[3]{Re}$;
- 3) при $Re > 4000$ $\lambda = 0,11 \left(\frac{K_s}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$.

Здесь K_s – коэффициент эквивалентной шероховатости.

Рассмотрим сначала следующую задачу: в начале участка давление газа поддерживается автоматическим регулятором на одном и том же уровне P_0 , а в конце этого участка регулирующий клапан мгновенно закрывается. Математическая формулировка данной задачи такова:

$$\frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial P(x,t)}{\partial x} + \frac{\lambda}{2d} \frac{gRT}{P(x,t)} Q(x,t)^2 = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} + c^2 \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} = 0, \quad 0 < x < L, \quad t > 0; \quad (5)$$

$$P(x,0) = f(x), \quad 0 \leq x \leq L; \quad (6)$$

$$Q(x,0) = f(x), \quad 0 \leq x \leq L; \quad (7)$$

$$P(0,t) = P_0 = \text{const}, \quad t > 0; \quad (8)$$

$$\frac{\partial Q(0,t)}{\partial x} = 0, \quad t > 0; \quad (9)$$

$$\frac{\partial P(L,t)}{\partial x} = 0, \quad t > 0; \quad (10)$$

$$Q(L,t) = 0, \quad t > 0. \quad (11)$$

Уравнения (8) и (9) задают условия в начале трубопровода, возникающие из-за наличия регуля-

тора, поддерживающего давление на заданном уровне. Граничные условия (10) и (11) для конечной точки трубопровода – это резкое закрытие задвижки и отсутствие расхода в этой точке.

Для численного решения задачи построим пространственно-временную область $\{0 < x < L, t > 0\}$ сеткой, образуемой прямыми:

$$x = i \cdot \Delta x, \quad i = \overline{0, n}, \quad n = \frac{L}{\Delta x};$$

$$y = k \cdot \Delta t, \quad k = \overline{0, n}.$$

Здесь Δx и Δt – размеры шагов по длине газопровода и времени.

Далее заменим частные производные следующими конечными разностями:

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} \approx \frac{P(x,t+\Delta t) - P(x,t)}{\Delta t};$$

$$\frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} \approx \frac{Q(x,t+\Delta t) - Q(x,t)}{\Delta t};$$

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial x} \approx \frac{P(x+\Delta x,t) - P(x,t)}{\Delta x};$$

$$\frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} \approx \frac{Q(x,t) - Q(x-\Delta x,t)}{\Delta x}.$$

Таким образом, для решения данной задачи использовали смешанную конечно-разностную схему, которая в данном случае показала наилучшие практические результаты (рис. 1).

В результате для уравнений (4) и (5) получим следующие конечно-разностные аппроксимации:

$$\frac{Q(x,t+\Delta t) - Q(x,t)}{\Delta t} + \frac{P(x+\Delta x,t) - P(x,t)}{\Delta x} + \frac{\lambda}{2d} \frac{gRT}{P} Q(x,t)^2 = 0; \quad (12)$$

$$\frac{P(x,t+\Delta t) - P(x,t)}{\Delta t} + c^2 \frac{Q(x+\Delta x,t) - Q(x,t)}{\Delta x} = 0. \quad (13)$$

Для удобства записи, введем следующие обозначения:

$$x = i \cdot \Delta x, \quad t = k \cdot \Delta t, \\ f(x,t) = f(i \cdot \Delta x, k \cdot \Delta t) = f_{i,k}.$$

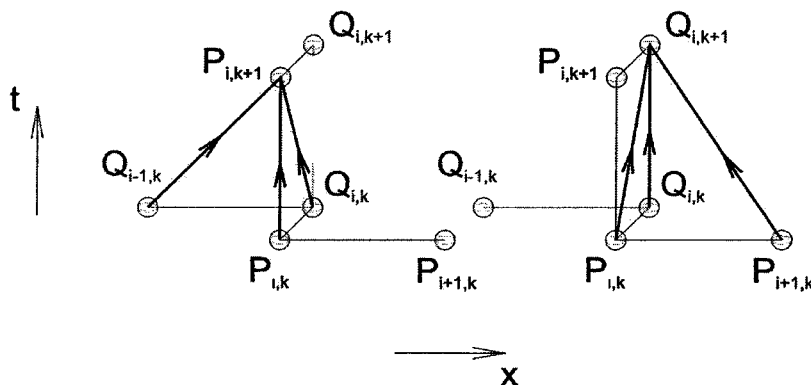


Рис. 1. Используемая разностная схема

Инженерное оборудование зданий и сооружений

Тогда уравнения (12) и (13) примут следующий вид:

$$\frac{Q_{i,k+1} - Q_{i,k}}{\Delta t} + \frac{P_{i+1,k} - P_{i,k}}{\Delta x} + \frac{\lambda}{2d} \frac{gRT}{P_{i,k}} Q_{i,k}^2; \quad (14)$$

$$\frac{P_{i,k+1} - P_{i,k}}{\Delta t} + c^2 \frac{Q_{i,k} - Q_{i-1,k}}{\Delta x} = 0. \quad (15)$$

Далее, получим уравнения для определения P и Q , на $(k+1)$ -м временном слое, при всех известных точках на k -м временном слое.

$$Q_{i,k+1} = Q_{i,k} + \Delta t \left(\frac{P_{i+1,k} - P_{i,k}}{\Delta x} + \frac{\lambda}{2d} \frac{gRT}{P_{i,k}} Q_{i,k}^2 \right); \quad (16)$$

$$P_{i,k+1} = P_{i,k} - \frac{c^2 \cdot \Delta t}{\Delta x} (Q_{i,k} - Q_{i-1,k}). \quad (17)$$

Следовательно, по данным k -го временного слоя можно определить P и Q на $(k+1)$ -м слое.

Аппроксимируем граничные условия в начале и конце трубопровода (8)–(11):

$$P(0,t) = P_0 = \text{const} \Rightarrow P_{0,k} = \text{const};$$

$$\frac{\partial Q(0,t)}{\partial x} = 0 \Rightarrow \frac{Q_{+1,k} - Q_{-1,k}}{2\Delta x} = 0 \Rightarrow Q_{+1,k} = Q_{-1,k};$$

$$\frac{\partial P(L,t)}{\partial x} = 0 \Rightarrow \frac{P_{n+1,k} - P_{n-1,k}}{2\Delta x} = 0 \Rightarrow P_{n+1,k} = P_{n-1,k};$$

$$Q(L,t) = 0 \Rightarrow Q_{n,k} = 0.$$

Для компьютерной реализации вышеприведенных соотношений разработали специальный программный комплекс со следующими особенностями. При расчётах в памяти хранится информация только о k -м и $(k+1)$ -м временных слоях. При переходе на следующий шаг по времени данные ячеек с $(k+1)$ -го слоя переписываются в k -й слой и вычисления повторяются. Данный приём позволяет значительно сократить объем занимаемой оперативной памяти (т. е. в памяти задействованы

только $2n$ ячеек), что позволяет существенно увеличить скорость расчётов. Результаты, полученные в каждой итерации, в тот же момент отображаются на строящихся графиках, что делает данную программу максимально динамичной, удобной при использовании, наглядной и понятной пользователю.

Явление гидродинамического удара для несжимаемой жидкости достаточно подробно изучено Н.Е. Жуковским и его учениками. В системах газоснабжения транспортируемый газ никаким образом не может быть отнесен к несжимаемой жидкости. Поэтому в случае с газом будут иметь место несколько другие процессы. Выясним с помощью разработанного программного комплекса случай с газодинамическим ударом, т. е. ситуацию при резком закрытии задвижки в конце газопровода. Давление в начале магистрали в любой момент времени $P(0,t) = 0,6$ МПа, считаем, что оно поддерживается на заданном уровне регулятором давления. В конце магистрали перед задвижкой в начальный момент времени давление равняется $P(L,0) = 0,57$ МПа (учитывая потери давления на трение).

Результаты моделирования данной задачи представлены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что скачок давления при резком закрытии задвижки не превышает 0,62 МПа, т. е. давление повышается не более чем на 10 % от стационарного значения.

При проведении ремонтных работ на ГРС вследствие неправильных действий обслуживающего персонала возможен проскок кратковременного импульса высокого давления через байпасную линию.

Настроим математическую модель на следующие граничные условия. В начале трубопровода треугольный импульс давления, т. е. $P(0,t) = f(t)$ –

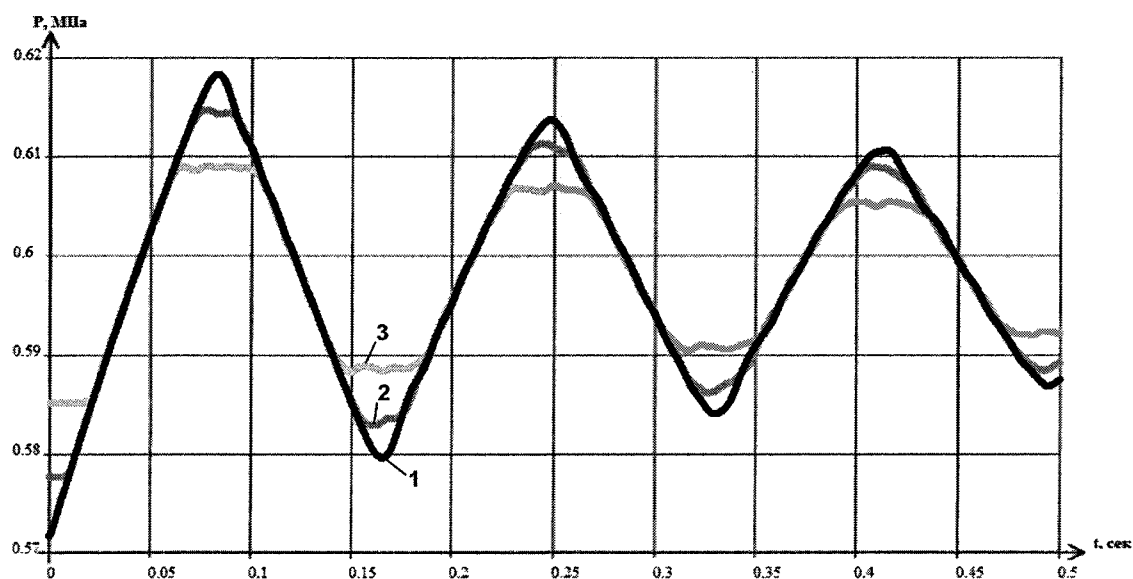


Рис. 2. Кривые изменения давления при резком закрытии задвижки: 1 – давление в конце газопровода; 2 – давление в точке 0,75 длины газопровода; 3 – давление в середине газопровода

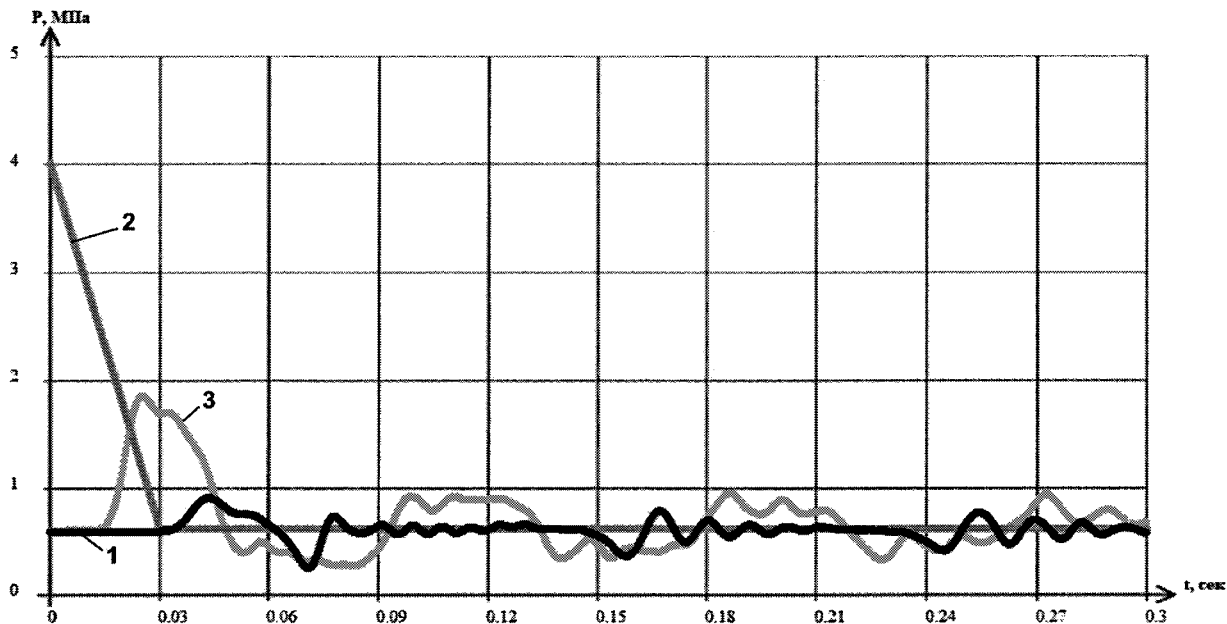


Рис. 3. График изменения давления при кратковременном импульсе высокого давления: 1 – давление в конце газопровода; 2 – давление в начале газопровода; 3 – давление в середине газопровода

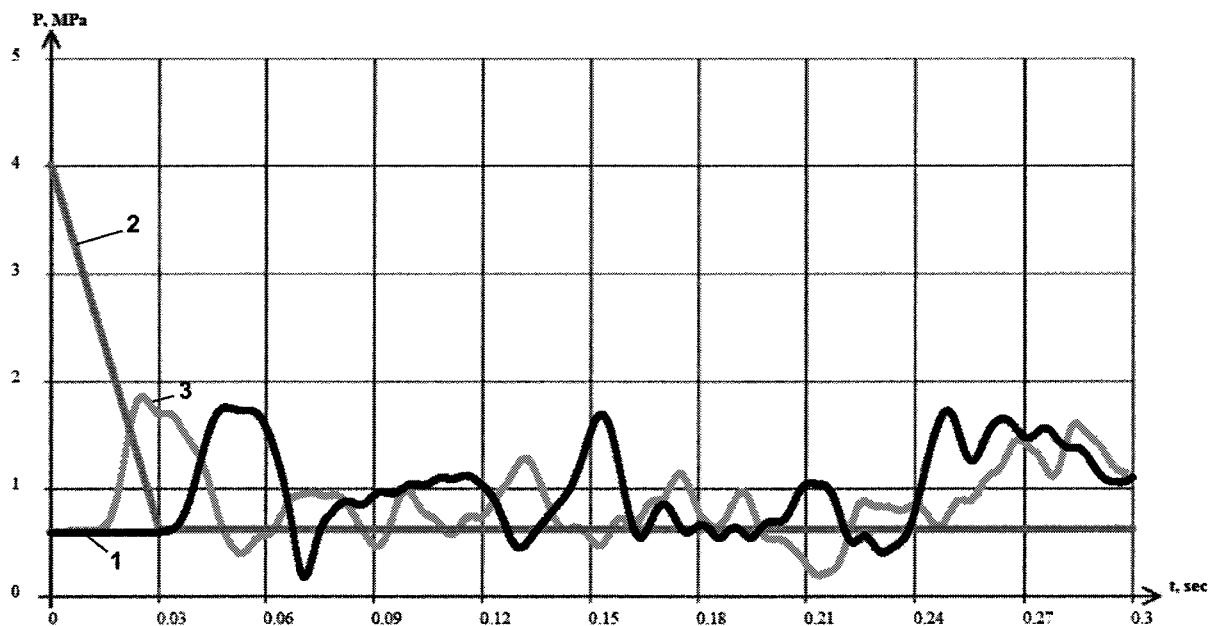


Рис. 4. График изменения давления при совместном влиянии двух факторов: 1 – давление в конце газопровода; 2 – давление в начале газопровода; 3 – давление в середине газопровода

уменьшается от 4 МПа, до 0,6 МПа с каждым шагом по времени. В конце трубопровода, установлен регулятор давления, поддерживающий давление на уровне, $P(L, t) = 0,57$ МПа.

Решая поставленную задачу, с помощью разработанной программы, получили следующие результаты (рис. 3).

Из графика видно, что проскок импульса высокого давления вызывает крайне нестационарный процесс, однако амплитуда колебаний относительно невелика, и колебания достаточно быстро затухают.

Теперь рассмотрим совместное влияние двух факторов – это кратковременный импульс высокого давления через байпас, далее при повышении давления в конце магистрали выше 0,6 МПа автоматически резко закрывается заслонка, установленная в данной точке газопровода. Результаты численного эксперимента приведены на рис. 4.

Данные результаты показывают, что совместное влияние этих двух факторов приводит к катастрофическим последствиям.

Полученные результаты достаточно важны для практики, потому что в настоящее время перед

ГРУ или ГРП обычно устанавливается автоматическая заслонка, закрывающаяся при повышении давления. В этом случае для предотвращения вышеописанной аварийной ситуации необходимо предусмотреть специальные устройства.

Литература

1. Панферов, В.И. Моделирование нестационарных процессов в газопроводах / В.И. Панферов, С.В. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2007. – Вып 4. – № 14. – С. 44–47.

2. Чарный, И.А. Основы газовой динамики / И.А. Чарный. – М.: Гостехиздат, 1961. – 196 с.

3. Галиуллин, З.Т. Интенсификация магистрального транспорта газа / З.Т. Галиуллин, Е.В. Леонтьев. – М.: Недра, 1991. – 272 с.

4. Баясанов, Д.Б. Автоматизированные системы

управления трубопроводными объектами коммунального хозяйства / Д.Б. Баясанов. – М.: Стройиздат, 1974. – 312 с.

5. Юсубов, Ч.А. Численное определение нестационарных процессов в магистральных газопроводах / Ч.А. Юсубов // Проблемы энергетики. – 2003. – № 2. – С. 62–65.

6. Поляков, Г.Н. Моделирование и управление газотранспортными системами / Г.Н. Поляков, Е.И. Яковлев, А.С. Пиотровский. – СПб.: Недра, 1992. – 256 с.

7. Бобровский, С.А. Гидравлический расчет распределительных трубопроводов / С.А. Бобровский. – М.: Стройиздат, 1968. – 159 с.

8. СП 42-101-2003 «Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб». – М.: ЗАО «Полимергаз», 2003. – 174 с.

Поступила в редакцию 15 сентября 2008 г.

Панферов Владимир Иванович. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплогасоснабжение и вентиляция» ЮУрГУ.

Область научных интересов: моделирование и оптимизация теплотехнических процессов и систем, автоматизация технологических объектов.

Vladimir I. Panferov. Doctor of technical science, professor, head of the Heat and Gas Supply and Ventilation department of South Ural State University in 2008.

Scientific interests: simulation and optimization of heat engineering processes and systems, automation of technological objects.

Февралёв Алексей Андреевич. Инженер, выпускник кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция» ЮУрГУ 2008 года.

Область научных интересов: компьютерное моделирование процессов в системах теплогасоснабжения и вентиляции.

Alexey A. Fevraleyev. Engineer, graduated from the Heat and Gas Supply and Ventilation department of South Ural State University in 2008.

Scientific interests: computer simulation of processes in the systems of heat and gas supply and ventilation.