

Моделирование динамики давления в газопроводе с путевым отбором

И. Ф. Чупров, М. С. Пармузина*, А. А. Лютоев

Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия,

**mparmuzina@ugtu.net*

Аннотация Магистральные, промысловые и городские газонефтепроводы часто работают в нестационарном режиме. Причинами неустойчивости давления, скорости, расхода газа являются изменения режимов работы насосных станций, включение и выключение агрегатов, попутный отбор или подкачка и другие факторы.

Магистральные трубопроводы представляют собой сложную инженерную систему. Важнейший фактор работы этой системы — безаварийность. Для этого необходимо изучение режимов движения транспортируемой среды, в частности, изучение динамики давления в период пуска или остановки, а также в случае отбора в заданных точках. Цель данной статьи заключается в построении математической модели и изучении динамики давления в газопроводе с точкой отбора.

Широкое развитие теория нестационарного движения жидкостей в круглых трубах получила в работах И. А. Чарного. В них рассмотрен большой комплекс инженерных задач с учетом вязких свойств транспортируемой среды и сопротивления трубы в гидравлическом приближении. В статье на основе исследований И. А. Чарного о движении реальной жидкости в круглых трубах составлено уравнение в частных производных гиперболического типа. Уравнение описывает нестационарное давление горизонтального участка газопровода с точкой отбора. Использование импульсной функции Дирака позволило сформулировать задачу в виде одного уравнения. На концах заданного участка заданы давления, а начальная скорость связана с импульсной функцией. С использованием конечного синус-преобразования Фурье уравнение в частных производных преобразовано в обыкновенное дифференциальное уравнение и решено. Решение уравнения представляет образ решения исходной задачи. Формулы обратного преобразования, основанные на теории рядов Фурье, позволили перейти к решению поставленной задачи.

Получены явные зависимости для динамики нестационарного давления. Качественный анализ формул свидетельствует о волновом движении среды в начальный период работы. Через небольшой промежуток времени процесс переходит в стационарный режим. Время переходного периода зависит от большого количества факторов. Главными факторами служат коэффициент гидравлического сопротивления и скорость транспортируемой среды.

Рассмотрен пример для горизонтального участка при изотермическом течении. При принятых числовых параметрах переход в стационарное состояние составляет около 17 минут от начала процесса. Приведены графики динамики давления при отборе в заданной точке и без такового.

Математические модели движения жидкости и газа по трубам могут быть использованы инженерами при проектировании трубопроводов, а также при решении задач, возникающих в период их эксплуатации. К ним относятся задачи контроля состояния трубопроводной системы, оптимизации работы, оценки аккумулирующей способности и другие.

Ключевые слова: трубопровод, нестационарное давление, уравнение гиперболического типа, синус-преобразование, коэффициент гидравлического сопротивления, отбор

Для цитирования: Чупров, И. Ф. Моделирование динамики давления в газопроводе с путевым отбором / И. Ф. Чупров, М. С. Пармузина, А. А. Лютоев. – DOI 10.31660/0445-0108-2024-5-104-116 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2024. – № 5. – С. 104–116.

Modelling pressure dynamics in a gas pipeline with an in-line sampling

Ilya F. Chuprov, Maria S. Parmuzina*, Alexander A. Lyutoev

Abstract. Gas pipelines, whether main, field, or urban, often operate in non-stationary modes. Changes in the operating modes of pumping stations, equipment start-up and shutdown, an in-line sampling or pumping and various factors are causes of instability of pressure, velocity, gas flow rate. Main pipelines are complex engineering systems with the pipeline itself being the main element. Fail-safety is the major factor in the operation of this system. Ensuring operational safety requires studying the movement regimes of the transported medium, particularly study of the dynamics of pressure during start-up or shutdown and at specific extraction points. This article aims to build a mathematical model and study the pressure dynamics in a gas pipeline with a sampling point. The theory of non-stationary motion liquid in round pipes has been strongly developed in the works of I. A. Charnyj. These works consider a large complex of engineering tasks taking into account viscous properties of the transported medium and pipe resistance in the hydraulic approximation. In the article on the basis of I. A. Charnyj's researches on the motion of real liquid in circular pipes the equation in partial derivatives of hyperbolic type is compiled. The equation describes the unsteady pressure of a horizontal section of gas pipeline with an extraction point. Using the Dirac delta function allows the formulation of the problem in the form of a single equation. Pressures are set at the ends of a given section, and the initial velocity is related to the Dirac delta function. By applying the finite Fourier sine transform, the partial differential equation is transformed into an ordinary differential equation and solved. Solution of equation is vision of a solution to the initial task. Inverse transform formulas based on Fourier theory allowed us to proceed to the solution of this task. Explicit dependences for the dynamics of unsteady pressure are obtained. The qualitative analysis of the formulas indicates the wave motion of a medium during the initial phase of operation, transitioning into a stationary mode after a brief period. The duration of the transition period depends on factors such as the hydraulic resistance coefficient and the velocity of the transported medium. Coefficient of hydraulic resistance and the velocity of the transported medium are the main factors. An example is considered for a horizontal section under isothermal flow conditions. With assumed numerical parameters, the transition to a stationary state occurs approximately 17 minutes after the process begins, as illustrated in the graphs provided in the article. Engineers can use mathematical models of the liquid and gas motion through pipes in the design of pipelines, as well as in solving tasks that arise during their operation. These tasks include monitoring the condition of the pipeline system, optimizing the operation, accumulation capacity estimates and others.

Keywords: pipeline, non-stationary pressure, hyperbolic type equation, sine transform, hydraulic resistance coefficient, sampling

For citation: Chuprov, I. F., Parmuzina, M. S. & Lyutoev A. A. (2024). Modelling pressure dynamics in a gas pipeline with an in-line sampling. Oil and Gas Studies, (5), pp.104-116. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2024-5-104-116

Введение

Нестационарные (неустойчивые) процессы в нефтегазопроводах характеризуются изменением по координате и времени давления, скорости, расхода, температуры транспортируемой среды. Другими словами, перечисленные параметры являются функциями времени. Нестационарные режимы чаще всего связаны с различными техническими операциями: пуск или остановка, включение и отключение агрегатов, изменение режима насосных станций, а также режима работы попутных сосредоточенных отборов-подкачек.

В фундаментальной работе [1] И. А. Чарный получил систему уравнений, которая в настоящее время считается основной математической моделью для нестационарных гидравлических расчетов в круглых трубах. Для горизонтального участка трубопровода при изотермическом течении и в случае дозвуковых скоростей, когда можно пренебречь изменением скоростных напоров, линеаризованная система имеет вид [1]

$$\begin{cases} -\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial t} + 2aQ, \\ -\frac{1}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial x}, \end{cases} \quad (1)$$

где $P = P(x, t)$ — давление; t — время; $Q = \rho v$ — массовая скорость; ρ — плотность; v — скорость (усредненная по сечению) транспортируемой среды; $2a = \left(\frac{\lambda v}{8\sigma} \right)_{cp}$, λ — коэффициент гидравлического сопротивления, σ — смоченный периметр трубопровода (для круглых труб при напорном течении $\sigma = \frac{\pi R^2}{2\pi R} = \frac{R}{2} = \frac{d}{4}$, где d — внутренний диаметр, R — радиус), c — скорость распространения ударной волны в упругом трубопроводе [2, 3]:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{E_{ж}}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{D \cdot E_{ж}}{E_{тр} \cdot \delta}}},$$

где $E_{ж}$, $E_{тр}$ — объемные модули упругости среды и трубы; D — диаметр трубы (внешний); δ — толщина стенок трубы; ρ — плотность жидкости.

Если $E_{тр} \rightarrow \infty$, то $c = \sqrt{\frac{E_{ж}}{\rho}}$ — скорость звука в жидкости.

Объект и методы исследования

Пусть на рассматриваемом участке трубопровода длиной L в точке $x_1 \in (0; L)$ происходит отбор с массовой скоростью G (кг/с). В этом случае необходимо дополнить второе уравнение системы — уравнение неразрывности. При этом система (1) примет вид:

$$\begin{cases} -\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial t} + 2aQ, \\ -\frac{1}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{G}{S} \delta(x - x_1), \end{cases} \quad (2)$$

где $\delta(x)$ — импульсная функция Дирака [4, 5, 6], S — площадь внутреннего сечения трубы. Функция Дирака показывает, что в точке $x = x_1$ происходит отбор единицы транспортируемой среды в единицу времени.

Перейдем от системы (2) к одному уравнению относительно давления [7, 8]. Для этого вычислим производные (по x для первого уравнения и по t для второго уравнения системы (2)).

$$\begin{cases} -\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 Q}{\partial t \partial x} + 2a \frac{\partial Q}{\partial x}, \\ -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial t}. \end{cases} \quad (3)$$

Учитывая, что смешанные производные одного порядка в области непрерывности равны, и подставив $\frac{dQ}{dx}$ из второго уравнения системы (2), получим

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \frac{2a}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{2aG}{S} \delta(x - x_1). \quad (4)$$

Постановка краевых условий к задаче (4).

Задача (4) — это гиперболическое неоднородное уравнение второго порядка. Для решения конкретной задачи необходимо задать краевые условия. В качестве граничных условий зададим давления на концах рассматриваемого участка трубопровода, то есть условия первого рода

$$P(x, t)|_{x=0} = P_{\#} = const, \quad P(x, t)|_{x=L} = P_{\kappa} = const. \quad (5)$$

Начальные условия должны описывать давление и начальный импульс при $t = 0$. Пусть

$$P(x, t)|_{t=0} = P_0 = const. \quad (6)$$

Начальный импульс (скорость) должен быть связан с воздействием источника в точке x_1 . Для этого воспользуемся вторым уравнением системы (2)

при $t = 0$: $-\frac{1}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} \Big|_{t=0} = \frac{\partial Q}{\partial x} \Big|_{t=0} + \frac{G}{S} \delta(x - x_1)$. Отсюда следует

$$\frac{\partial P}{\partial t} \Big|_{t=0} = -\frac{c^2 G}{S} \delta(x - x_1), \quad (7)$$

так как $\frac{\partial Q}{\partial x} \Big|_{t=0} = \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} \Big|_{t=0} = 0$. Это следует из условия (6). При постоянном давлении по всей длине трубопровода скорость $v = 0$.

Таким образом, поставлена задача: найти решение уравнения (4) при граничных условиях (5) и начальных условиях (6)–(7). Схема участка трубопровода с отбором в точке x_1 приведена на рисунке 1.



Рис. 1. Схема трубопровода с отбором

Поставленную задачу будем решать с помощью конечного преобразования

Фурье с ядром преобразования $\frac{2}{L} \cdot \sin \frac{n\pi x}{L}$.

Формула прямого и обратного преобразований:

$$\begin{cases} \bar{P}_n(t) = \frac{2}{L} \int_0^L P(x, t) \cdot \sin \frac{n\pi x}{L} dx, \\ P(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{P}_n(t) \cdot \sin \frac{n\pi x}{L}. \end{cases} \quad (8)$$

Все члены уравнения (4) умножим на ядро преобразования и интегрируем от 0 до L.

$$\begin{aligned} \frac{2}{L} \int_0^L \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \sin \frac{n\pi x}{L} dx &= \frac{1}{c^2} \frac{2}{L} \int_0^L \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \sin \frac{n\pi x}{L} dx + \frac{2a}{c^2} \frac{2}{L} \int_0^L \frac{\partial P}{\partial t} \sin \frac{n\pi x}{L} dx + \\ &+ \frac{2aG}{S} \frac{2}{L} \int_0^L \delta(x - x_1) \sin \frac{n\pi x}{L} dx. \end{aligned}$$

Вычислим интегралы.

$$\begin{aligned} 1) \quad \frac{2}{L} \int_0^L \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \sin \frac{n\pi x}{L} dx &= \frac{2n\pi (P_n - (-1)^n \cdot P_n)}{L^2} - \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \cdot \bar{P}_n(t), \\ 2) \quad \frac{1}{c^2} \frac{2}{L} \int_0^L \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \sin \frac{n\pi x}{L} dx &= \frac{1}{c^2} \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{2}{L} \int_0^L P(x, t) \sin \frac{n\pi x}{L} dx \right) = \frac{1}{c^2} \frac{d^2 \bar{P}_n(t)}{dt^2}, \\ 3) \quad \frac{2a}{c^2} \frac{2}{L} \int_0^L \frac{\partial P}{\partial t} \sin \frac{n\pi x}{L} dx &= \frac{2a}{c^2} \frac{d}{dt} \left(\frac{2}{L} \int_0^L P(x, t) \sin \frac{n\pi x}{L} dx \right) = \frac{2a}{c^2} \frac{d \bar{P}_n(t)}{dt}. \end{aligned}$$

При вычислении двух последних интегралов применена теорема о дифференцировании интеграла по параметру.

$$4) \frac{2aG}{S} \cdot \frac{2}{L} \int_0^L \delta(x-x_1) \sin \frac{n\pi x}{L} dx = \frac{4aG}{LS} \sin \frac{n\pi x_1}{L}.$$

При вычислении последнего интеграла использовано свойство импульсной функции [4]: $\int_a^b f(x) \cdot \delta(x-x_0) dx = f(x_0)$, если $x_0 \in [a; b]$.

В результате интегрального преобразования получим обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 \overline{P}_n(t)}{dt^2} + 2a \cdot \frac{d \overline{P}_n(t)}{dt} + \left(\frac{cn\pi}{L} \right)^2 \overline{P}_n(t) = (P_n - (-1)^n P_\kappa) \frac{2n\pi c^2}{L^2} - \frac{4ac^2 \cdot G}{LS} \cdot \sin \frac{n\pi x_1}{L}. \quad (9)$$

Преобразуем начальные условия (6)–(7)

$$\overline{P}_n(0) = \frac{2}{L} \int_0^L P_0 \cdot \sin \frac{n\pi x}{L} dx = \frac{2P_0}{n\pi} (1 - (-1)^n). \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{d \overline{P}_n(0)}{dt} &= \frac{2}{L} \int_0^L \left. \frac{\partial P}{\partial t} \right|_{t=0} \cdot \sin \frac{n\pi x}{L} dx = -\frac{2}{L} \frac{c^2 G}{S} \int_0^L \delta(x-x_1) \sin \frac{n\pi x}{L} dx = \\ &= -\frac{2c^2 G}{SL} \sin \frac{n\pi x_1}{L}. \end{aligned} \quad (11)$$

Обозначим коэффициент $\left(\frac{cn\pi}{L} \right)^2 = \beta_n^2$, а правую часть уравнения

$$(P_n - (-1)^n P_\kappa) \frac{2n\pi c^2}{L^2} - \frac{4ac^2 \cdot G}{LS} \cdot \sin \frac{n\pi x_1}{L} = A_n.$$

Тогда (9) примет вид

$$\frac{d^2 \overline{P}_n(t)}{dt^2} + 2a \cdot \frac{d \overline{P}_n(t)}{dt} + \beta_n^2 \overline{P}_n(t) = A_n. \quad (12)$$

Решаем задачу (12) при условиях (10) и (11).

Характеристическое уравнение для однородного уравнения: $r^2 + 2a \cdot r + \beta_n^2 = 0$. Решение характеристического уравнения

$r_{1,2} = -a \pm \sqrt{a^2 - \beta_n^2} = -a + wi$, где $w^2 = \beta_n^2 - a^2$ и $w = \sqrt{\beta_n^2 - a^2}$, i — мнимая единица.

Общее решение дифференциального уравнения (12), учитывая, что правая часть не зависит от t , примет вид

$$\bar{P}_n(t) = e^{-at} \left(M_n \cos(wt) + N_n \sin(wt) \right) + \frac{A_n}{\beta_n^2}. \quad (13)$$

Подчинив решение (13) начальным условиям (10) и (11), найдем, что

$$\begin{aligned} M_n &= \frac{2P_0}{n\pi} \left(1 - (-1)^n \right) - \frac{A_n}{\beta_n^2}, \\ N_n &= \frac{aM_n}{w} - \frac{2c^2G}{wSL} \sin \frac{n\pi x_1}{L} = \frac{2aP_0}{n\pi w} \left(1 - (-1)^n \right) - \frac{aA_n}{w\beta_n^2} - \frac{2c^2G}{wSL} \sin \frac{n\pi x_1}{L}. \end{aligned} \quad (14)$$

Образ решения найден. Напишем решение согласно формуле обращения (8)

$$\begin{aligned} P(x, t) &= e^{-at} \sum_{n=1}^{\infty} \left(M_n \cos(wt) + N_n \sin(wt) \right) \cdot \sin \frac{n\pi x}{L} + \\ &+ \frac{2P_n}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi x}{L}}{n} - \frac{2P_\kappa}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \sin \frac{n\pi x}{L}}{n} - \\ &- \frac{4aLG}{\pi^2 S} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi x_1}{L} \cdot \sin \frac{n\pi x}{L}}{n^2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Решение (15) для анализа можно представить в более удобной форме, если найти сумму рядов. Известно [9], что

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin ky}{k} &= \frac{\pi - y}{2} \text{ при } 0 \leq y \leq 2\pi; \\ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1} \sin ky}{k} &= \frac{y}{2} \text{ при } -\pi \leq y \leq \pi. \end{aligned}$$

Преобразуем эти формулы для нашего случая

$$\begin{aligned} \frac{2P_n}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi x}{L}}{n} &= \frac{2P_n}{\pi} \frac{\pi - \frac{\pi}{L}x}{2} = P_n \frac{L - x}{L} \text{ при } 0 \leq x \leq 2L; \\ \frac{2P_\kappa}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \sin \frac{n\pi x}{L}}{n} &= -\frac{2P_\kappa}{\pi} \frac{\pi x}{2L} = -P_\kappa \frac{x}{L} \text{ при } -L \leq x \leq L. \end{aligned}$$

С учетом этих суммирований решение (15) будет иметь вид

$$P(x,t) = e^{-at} \sum_{n=1}^{\infty} (M_n \cos(wt) + N_n \sin(wt)) \cdot \sin \frac{n\pi x}{L} + P_H + \frac{P_K - P_H}{L} x - \frac{4aLG}{\pi^2 S} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi x_1}{L} \cdot \sin \frac{n\pi x}{L}}{n^2}. \quad (16)$$

Проведем анализ полученного решения (16). Учет в поставленной задаче (4) инерционного слагаемого $\frac{1}{c^2} \frac{d^2 P}{dt^2}$ приводит к волновому течению в трубопроводе с убывающей амплитудой e^{-at} . Время перехода к стационарному состоянию пропорционально коэффициенту гидравлического сопротивления и скорости движения газа, так как $2a = \lambda \left(\frac{v}{8\sigma} \right)_{cp}$.

При стационарном режиме (теоретически при $t \rightarrow \infty$) давление определяется зависимостью

$$P(x,t) = P_H + \frac{P_K - P_H}{L} x - \frac{4aLG}{\pi^2 S} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi x_1}{L} \cdot \sin \frac{n\pi x}{L}}{n^2}. \quad (17)$$

Для трубопровода без отбора ($G = 0$) нестационарное давление можно вычислить

$$P(x,t) = P_H + \frac{P_K - P_H}{L} x + e^{-at} \sum_{n=1}^{\infty} (K_n \cos(wt) + J_n \sin(wt)) \cdot \sin \frac{n\pi x}{L},$$

где
$$K_n = \frac{2P_0}{n\pi} (1 - (-1)^n) - \frac{2(P_H - (-1)^n P_K)}{n\pi},$$

$$J_n = \frac{2aP_0}{n\pi w} (1 - (-1)^n) - \frac{2a(P_H - (-1)^n P_K)}{wn\pi}. \quad (18)$$

При больших временах (18) трансформируется в линейную зависимость

$$P(x,t) = P_H + \frac{P_K - P_H}{L} x. \quad (19)$$

Результаты

В качестве примера рассмотрим участок газопровода диаметром $D = 1,22$ м (внутренний диаметр $d = 1,196$ м) между двумя насосными станциями, расстояние между которыми 120 км. Давление на начальном участке $P_H = 5,44$ МПа, давление на конечном $P_K = 4,23$ МПа. Коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda = 0,02$. Коэффициент отклонения реаль-

ного газа от идеального примем $Z = 1$. Газовая постоянная $R = 518 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, скорость звука $c = 427 \text{ м/с}$ при $T = 293 \text{ К}$ [10].

Массовый расход [11, 12]

$$M = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{(P_n^2 - P_k^2)d}{\lambda ZRTL}} \text{ (кг/с)}. \quad (20)$$

В нашем случае

$$M = \frac{\pi \cdot 1,196^2}{4} \sqrt{\frac{(5,44^2 - 4,23^2) \cdot 10^{12} \cdot 1,196}{0,02 \cdot 1 \cdot 518 \cdot 293 \cdot 120000}} = 221 \text{ кг/с}.$$

Плотность определяем линейным интерполированием на заданном участке при принятых давлениях на концах участка $\rho = 33 \text{ кг/м}^3$ [10]. Средняя скорость на этом участке $v = \frac{M}{\rho} = \frac{221}{33} = 6,7 \text{ м/с}$.

Коэффициент линеаризации

$$2a = \frac{\lambda v}{2d} = \frac{0,02 \cdot 6,7}{2 \cdot 1,196} = 0,056 \approx 0,06 \left(\frac{1}{c} \right).$$

Таким образом, для численных расчетов по формулам (16), (17), (18) получили следующие числовые параметры: $P_n = 5,44 \text{ МПа}$, $P_k = 4,23 \text{ МПа}$, $P_0 = 4,23 \text{ МПа}$, $L = 1,2 \cdot 10^5 \text{ м}$, $2a = 0,06 \frac{1}{c}$,

$$S = \frac{\pi \cdot 1,196^2}{4} = 1,12 \text{ м}^2, c = 427 \text{ м/с}.$$

Отбор в точке $x_1 = 5 \cdot 10^4 \text{ м}$ с массовым расходом $G = 70 \text{ кг/с}$ начинается мгновенно в начальный момент времени (начальное условие (7)). Графически этот факт отражается большими амплитудами за небольшой начальный период работы. С течением времени амплитуда колебаний быстро убывает, что видно из рисунка 2.

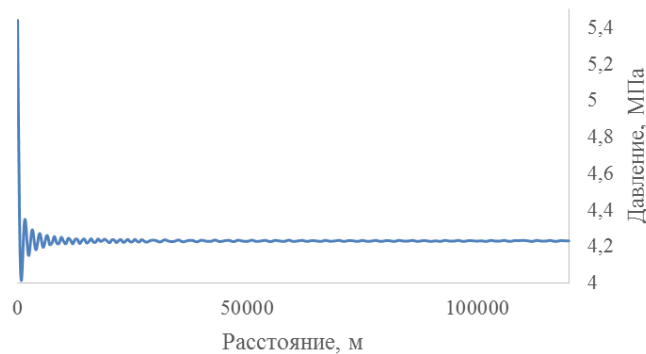


Рис. 2. Динамика давления газа в начальный период

Примерно через 17 минут при заданных выше параметрах процесс переходит в стационарный режим. На рисунке 3 представлена динамика давления без отбора и с отбором в точке $x_1 = 5 \cdot 10^4$ м.

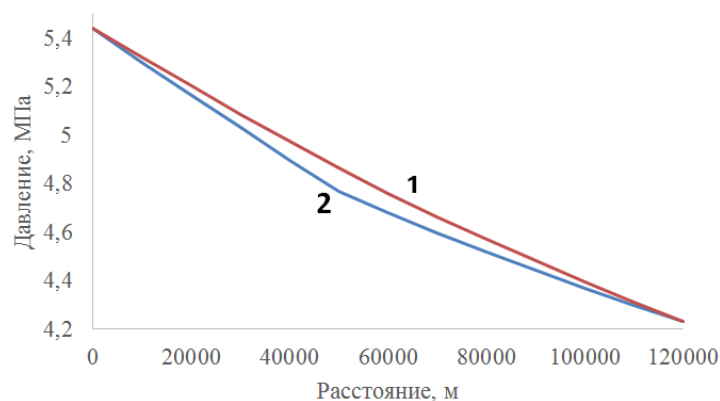


Рис. 3. Динамика давления газа в стационарном режиме
1) $G=0$ кг/с; 2) $G = 70$ кг/с в точке $x_1 = 5 \cdot 10^4$ м

Унифицированная математическая модель динамики нестационарного давления в сложных трубопроводных системах с использованием обобщенных функций Дирака и Хевисайда была предложена профессором М. А. Гусейнзаде [5, 7]. При этом поставленные им задачи были решены без учета инерционного слагаемого (второй производной по координате), то есть рассматриваются уравнения параболического типа. Решения задач ограничиваются получением формул динамики давления, конкретные примеры при реальных параметрах не рассматриваются.

Изучение динамики давления с использованием инерционного слагаемого позволило дополнительно определить период волнового течения после начала работы трубопровода.

Выводы

1) На основе исследований И. А. Чарного о движении реальных жидкостей в круглых трубах поставлена и решена задача о динамике нестационарного давления газа на горизонтальном участке трубопровода с отбором в заданной точке. Для описания массового отбора использована импульсная функция Дирака.

2) Качественный анализ полученной зависимости для поля давления показывает, что в начальный период работы трубопровода происходит волновое течение жидкости с быстро убывающей амплитудой. Период нестационарности зависит от нескольких факторов. Главными являются коэффициент гидравлического сопротивления и скорость потока.

3) Расчеты показали, что при заданных в примере параметрах процесс переходит в стационарный режим примерно через 17 минут.

Список источников

- 1) Чарный, И. А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах / И. А. Чарный. – Москва : Недра, 1975. – 296 с. – Текст : непосредственный.
- 2) Рабинович, Е. З. Гидравлика / Е. З. Рабинович. – Москва : Недра, 1980. – 278 с. – Текст : непосредственный.
- 3) Зезин, В. Г. Гидравлический удар. Расчет гидравлических параметров: учебное пособие / В. Г. Зезин. – Челябинск : ЮУрГУ, 2021. – 50 с. – Текст : непосредственный.
- 4) Гельфанд, И. М. Обобщенные функции и действия над ними / И. М. Гельфанд, Г. Е. Шилов. – Москва : Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. – 472 с. – Текст : непосредственный.
- 5) Сложные трубопроводные системы / В. В. Грачев, М. А. Гусейн-заде, Б. И. Ксенз, Е. И. Яковлев. – Москва : Недра, 1982. – 256 с. – Текст : непосредственный.
- 6) Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1972. – 735 с. – Текст : непосредственный.
- 7) Бобровский, С. А. Движение газа в газопроводах с путевым отбором / С. А. Бобровский, С. Г. Щербаков, М. А. Гусейн-заде. – Москва : Наука, 1972. – 192 с. – Текст : непосредственный.
- 8) Чупров, И. Ф. Реализация математической модели нестационарного движения газа в сложном трубопроводе при смешанных граничных условиях / И. Ф. Чупров, А. О. Кувакина, М. С. Пармузина. – DOI 10.17122/ntj-oil-2023-2-95-105. – Текст : непосредственный // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2023. – № 2 (142). – С. 95–105.
- 9) Градштейн, И. С. Таблицы интегралов, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – Под ред. А. Джеффри, Д. Цвиллингера. – 7-е изд.: Пер. с англ. Под ред. В. В. Максимова. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2011. – 1232 с. – Текст : непосредственный.
- 10) ГСССД 160-93. Газ природный расчетный. Плотность, фактор сжимаемости, энтальпия, энтропия, изобарная теплоемкость, скорость звука, показатель адиабаты и коэффициент объемного расширения при температурах 250 ... 450 К и давлениях 0,1... 12 МПа: таблицы стандартных справочных данных. – Москва : Комитет Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации, 1993. – 20 с.
- 11) Транспорт скважинной продукции: учебное пособие / Н. В. Чухарева, А. В. Рудаченко, А. Ф. Бархатов, Д. В. Федин. – Текст : непосредственный // Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 354 с. – Текст : непосредственный.
- 12) Луценко, М. Е. Проектирование промысловых нефтепроводов, подверженных влиянию нестационарных процессов / М. Е. Луценко, Н. В. Чухарева. – Текст : непосредственный // Транспорт и хранение углеводородов, ТХУ-2022: тезисы докладов III Международной научно-технической конференции молодых ученых, Омск, 21 апреля 2022, Омский государственный технический университет. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2022. – С. 71–73.

References

1. Charnyj, I. A. (1975). Neustanovivsheesya dvizhenie real'noj zhidkosti v trubah. Moscow, Nedra Publ., 296 p. (In Russian).
2. Rabinovich, E. Z. (1980). Gidravlika. Moscow, Nedra Publ., 278 p. (In Russian).
3. Zezin, V. G. (2021). Gidravlicheskiy udar. Raschet gidravlicheskih parametrov. Chelyabinsk, YUUrGu Publ., 50 p. (In Russian).
4. Gel'fand, I. M., & Shilov G. E. (1959). Obobshchennye funktsii i dejstviya nad nimi. Moscow, State Publishing House of Physical and Mathematical Literature, 472 p. (In Russian).
5. Grachev, V. V., Gusejn-zade M. A., Ksenz B. I., & Yakovlev E. I. (1982). Slozhnye truboprovodnye sistemy. Moscow, Nedra Publ., 256 p. (In Russian).
6. Tihonov, A. N., & Samarskiy A.A. (1972). Uravneniya matematicheskoy fiziki. Moscow, Nauka Publ., 735 p. (In Russian).
7. Bobrovskij, S. A., Shcherbakov S. G., & Gusejn-zade M. A. (1972). Dvizhenie gaza v gazoprovodah s putevym otborom. Moscow, Nauka Publ., 192 p. (In Russian).
8. Chuprov, I. F., Kuvakina, A. O., & Parmuzina, M. S. (2023). Implementation of a mathematical model of nonstationary gas movement in a complex pipeline under mixed boundary conditions. Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products, (2 (142)), pp. 95-105. (In Russian). DOI: 10.17122/ntj-oil-2023-2-95-105
9. Gradshteyn, I. S., & Ryzhik I. M. (2011). Tablitsy integralov, ryadov i proizvedenij. Saint-Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 1232 p. (In Russian).
10. GSSSD 160-93. (1993). Tables of standard reference data. Natural gas rated. Density, compressibility factor, enthalpy, entropy, isobaric specific heat, velocity of sound, index of adiabate and coefficient of volume thermal expansion in the temperature range 250...450 K and pressure range 0,1...12 MPa. Moscow, Committee of the Russian Federation for Standardization, Metrology and Certification, 20 p. (In Russian).
11. Chukhareva, N.V., Rudachenko, A. V., Barkhatov, A. F., & Fedin, D. V. (2011). Transport skvazhinnoj produktsii. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 354 p. (In Russian).
12. Lucenko, M. E., & Chuhareva, N. V. (2022). Proektirovanie promyslovykh nefteprovodov, podverzhennykh vliyaniyu nestacionarnykh processov: Transport i hranenie uglevodorodov, THU-2022: tezisy dokladov III Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchyonykh, Omsk, April 21, 2022, Omsk State Technical University. Omsk, Omsk State Technical University Publ., pp. 71-73. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Чупров Илья Федорович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры физики и высшей математики, Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта

Ilya F. Chuprov, Doctor of Engineering, Associate Professor at the Department of Physics and Advanced Mathematics, Ukhta State Technical University, Ukhta

Пармузина Мария Семеновна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры физики и высшей математики, Ухтинский государственный технический университет, Ухта, mparmuzina@ugtu.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3790-4743>

Лютеев Александр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры физики и высшей математики, Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4781-2540>

Maria S. Parmuzina, Candidate of Pedagogical, Associate Professor of Pedagogical, Associate Professor at the Department of Physics and Advanced Mathematics, Ukhta State Technical University, Ukhta, mparmuzina@ugtu.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3790-4743>

Aleksander A. Lyutov, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Physics and Advanced Mathematics, Ukhta State Technical University, Ukhta, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4781-2540>

Статья поступила в редакцию 12.03.2024; одобрена после рецензирования 16.06.2024; принята к публикации 01.07.2024.

The article was submitted 12.03.2024; approved after reviewing 16.06.2024; accepted for publication 01.07.2024.