

## ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ В УПРУГОВЯЗКИХ ТРУБАХ

**Р. А. ИСМАЙЛОВ, В. Т. МУСТАФАЕВ**

*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,  
Баку, Азербайджан*

**Аннотация.** *В работе исследованы особенности неустановившегося движения газовых потоков в трубопроводах, выполненных из упруговязких материалов. Показано, что при транспортировке неравновесных газов и наличии отложений на стенках труб, а также при использовании полимерных труб, материал трубопровода проявляет упруговязкие свойства, существенно влияющие на характер распространения волн возмущений давления. На основе фойгтовской и максвелловской реологических моделей получены математические модели движения газа в упруговязких трубах и аналитические соотношения для определения параметров затухания и фазового запаздывания волн давления. Проведено численное исследование влияния релаксационных параметров газа и материала трубы на частотные характеристики затухания и запаздывания. Установлено, что основное затухание волны обусловлено временем релаксации материала трубы, а при достижении определенной частоты дальнейший рост частоты не приводит к увеличению затухания. Показано, что максвелловская модель характеризуется более быстрым проявлением упруговязких свойств по сравнению с фойгтовской. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и эксплуатации газопроводов, транспортирующих неравновесные газы с применением полимерных и других упруговязких труб.*

**Ключевые слова:** *газопровод, упруговязкие трубы, неравновесные газы, распространение волн давления, затухание, фазовое запаздывание, релаксационные параметры, модель Фойгта, модель Максвелла, полимерные трубы, неустановившееся течение газа.*

При движении газов в стальных трубах материал трубы проявляет в основном только упругие свойства. Однако в определенных условиях, так например, при наличии жидких включений или транспортировке газов с тяжелыми фракциями углеводородов на стенках трубопроводов возникают различные отложения, при которых материал трубы может проявлять также и упруговязкие свойства. Упруговязкие свойства могут проявлять и трубы из полимерных материалов, перспектива использования которых в связи с экономической целесообразностью при строительстве газопроводов приобретает все более актуальное значение.

Основным достоинством полиэтиленовых труб является то, что они не подвержены коррозии и являются хорошим диэлектриком, что делает их незаменимыми при прокладке в зоне действия блуждающих токов. Полиэтиленовые трубы в среднем в 8 раз легче стальных, что облегчает их транспортировку и монтажные работы. Они легко режутся и свариваются, при этом отпадают газосварочные и газорезочные и электросварочные работы. Средний срок службы полиэтиленовых труб 50 лет, при этом они значительно дешевле стальных труб, что в условиях рыночных отношений является важным преимуществом по сравнению со стальными трубами. Эти и другие вопросы перспективы использования труб из полимерных материалов в трубопроводном транспорте газа поднимались в работах [1, 2].

Вопросы влияния неравновесных характеристик материала трубы на процессы распространения волн возмущений давления и расхода при движении по ним реологически сложных жидкостей с релаксационными параметрами подробно исследованы в [3–5]. Аналогично

этим исследованиям изучим влияние неравновесных параметров газов и материала трубы на распределение значений затухания и запаздывания волны возмущения давления в трубопроводе по частотам.

С этой целью исходную модель неустановившегося движения газа в трубе из упруговязкого материала запишем аналогично [3] в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial P}{\partial x} = -\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + m_0 f_0 w \right) \\ \sum_{i=0}^n \left[ b_i \frac{\partial^i}{\partial t^i} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \theta \frac{K_c^\infty}{K_c^0} b_i \frac{\partial^{i+1}}{\partial t^{i+1}} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \left( \frac{2R}{\delta_0} a_i + \frac{b_i}{K_c^0} \right) \frac{\partial^{i+1} P}{\partial t^{i+1}} + \right. \\ \left. + \left( \frac{2R}{\delta_0} \theta \frac{K_c^\infty}{K_c^0} a_i + \theta \frac{b_i}{K_c^0} \right) \frac{\partial^{i+2} P}{\partial t^{i+2}} \right] = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

В качестве реологической модели для материала трубы возьмем отдельно фойгтовскую и максвелловскую модели соответственно в виде следующих соотношений:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \dot{\varepsilon} \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\mu}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – деформация материала трубы;  
 $\sigma$  – напряжение в стенке трубопровода  
 $E$  – модуль упругости материала трубы;  
 $\eta$  – коэффициент, характеризующий вязкость материала.

Вначале рассмотрим фойгтовскую трубу. Из обобщенного реологического уравнения упруговязкой среды определяем значения коэффициентов  $a_i$  и  $b_i$  для случая фойгтовской среды и используя их в (1) после некоторых преобразований получаем следующую модель для движения неравновесных газов в трубе в виде:

$$C^2 \left( \lambda_T \frac{\partial}{\partial t} + 1 \right) \left( 1 + \theta \frac{C_\infty^2}{C_0^2} \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \beta_1 \frac{\partial^3 U}{\partial t^3} + \beta_2 \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \frac{\partial U}{\partial t}, \quad (4)$$

где  $U = \frac{\partial P}{\partial t} + m_0 f_0 P$ ;

$$\beta_1 = \theta \lambda_T \frac{C^2}{C_0^2};$$

$$\beta_2 = \lambda_T \frac{C^2}{C_0^2} + \theta \frac{C_\infty^2}{C_0^2} \frac{C^2}{\tilde{C}^2};$$

$$C^2 = \frac{K_c^0}{\rho \left( 1 + \frac{2R}{\delta_0} \frac{K_c^0}{E} \right)};$$

$$C_0^2 = \frac{K_c^0}{\rho}; \quad C_\infty^2 = \frac{K_c^\infty}{\rho};$$

$$\tilde{C}^2 = \frac{K_c^\infty}{\rho \left( 1 + \frac{2R K_c^\infty}{\delta_0 E} \right)};$$

$\theta$  и  $\lambda_T$  – времена релаксации соответственно для среды и материала трубы.

Решение уравнения (4), когда давление в начале трубы представляет собой гармоническую функцию времени заданной частоты будем искать в виде  $P(x, t) = P_0 e^{\alpha x + \omega t}$ , а  $\alpha$  представим в виде следующего соотношения:

$$\alpha = \frac{1}{C} \sqrt{K_1 + i\omega K_2} \quad (5)$$

где  $K_1 = \frac{R_1 R_2 + \omega^2 S_1 S_2}{R_2^2 + \omega^2 S_2^2};$

$$K_2 = \frac{S_1 R_2 - S_2 R_1}{R_2^2 + \omega^2 S_2^2}$$

$$R_1 = \beta_1 \omega^4 - (1 + \beta_2 m_0 f_0) \omega^2; \quad S_1 = m_0 f_0 - (\beta_1 m_0 f_0 + \beta_2) \omega^2;$$

$$R_2 = 1 - \lambda_T \theta \frac{C_\infty^2}{C_0^2} \omega^2; \quad S_2 = \lambda_T + \theta \frac{C_\infty^2}{C_0^2}. \quad (6)$$

Отделим в соотношении (5) для  $\alpha$  действительную и мнимую часть и выберем тот из корней, который имеет отрицательную действительную часть. Решение для (4) запишется в виде:

$$P = P_0 e^{-\xi \frac{x}{c}} e^{i\omega \left( t - v \frac{x}{c} \right)}, \quad (7)$$

где  $\xi = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\rho_1 + K_1}; \quad v = \frac{K_2}{2\xi}; \quad \rho_1 = \sqrt{K_1^2 + \omega^2 K_2^2}.$  (8)

Параметр  $\xi$  характеризует затухание, а параметр  $v$  запаздывание или сдвиг по фазе граничного значения гармоники давления.

Аналогично по проведенной выше процедуре для максвелловской трубы, описываемой соотношением (3) получена следующая модель для движения неравновесных газов в трубе в виде:

$$C^2 \left( \frac{\partial}{\partial t} + \theta \frac{C_\infty^2}{C_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \beta_1 \frac{\partial^3 U}{\partial t^3} + \beta_2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \beta_3 \frac{\partial U}{\partial t} \quad (9)$$

и получены следующие расчетные соотношения для вычисления параметров затухания и запаздывания:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \beta_1 \omega^4 - (m_0 f_0 \beta_2 + \beta_3) \omega^2; \\
 S_1 &= \beta_3 m_0 f_0 - (\beta_1 m_0 f_0 + \beta_2) \omega^2; \\
 R_2 &= -\theta \frac{C_\infty^2}{C_0^2} \omega^2; \\
 S_2 &= 1,
 \end{aligned} \tag{10}$$

где  $\beta_1 = \theta \frac{C_\infty^2}{C_0^2} \frac{C_0^2}{C_0^2};$

$$\beta_2 = 1 + \frac{2R}{\delta_0} \frac{\theta}{\lambda_T} \frac{C_\infty^2}{C_0^2} \frac{C_0^2}{C_T^2};$$

$$\beta_3 = \frac{2R}{\delta_0} \frac{1}{\lambda_T} \frac{C_0^2}{C_T^2} \tag{11}$$

Исследуем влияние релаксационных параметров  $\theta$  и  $\lambda$  среды (неравновесных газов) на распределение по частотам  $\omega$  параметров  $\xi$  и  $\nu$ . С этой целью на основании полученных выше соотношений для вычисления значений  $\xi$  и  $\nu$  была составлена и реализована компьютерная программа. Расчеты производились отдельно для фойгтовской и максвелловской трубы.

На основании вычисленных значений построены кривые качественного распределения параметра затухания  $\xi$  и параметра запаздывания  $\nu$  по частотам  $\omega$  при значениях  $m_0 f_0 = 0,1 \text{ с}^{-1}$ ,  $R = 0,2 \text{ м}$ ,  $\delta = 0,01 \text{ м}$  и следующих оценках

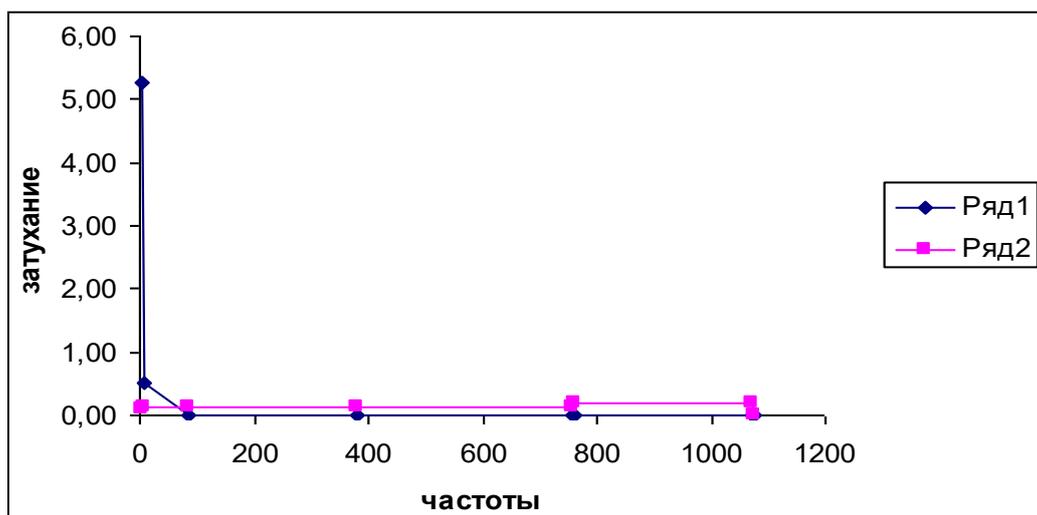
$$\frac{C_\infty^2}{C_0^2} = 1,1; \quad \frac{C_0^2}{C_0^2} = 0,9; \quad \frac{C_\infty^2}{C_0^2} \frac{C_0^2}{C_0^2} = 1,1; \quad \frac{C_0^2}{C_T^2} = 1.$$

Эти кривые соответственно для фойгтовской и максвелловской трубы при значениях  $\theta = 1 \text{ с}$  и  $\lambda_T = 1 \text{ с}$  даны на рис. 1 и рис. 2. Анализ данных кривых показывает, что для максвелловской трубы, начиная со значения  $\omega = 86 \text{ с}^{-1}$  дальнейшее возрастание частоты не вызывает затухания возмущений давления (рис. 1). Следует отметить, что аналогичная картина наблюдается, например для так называемых «стоячих волн». Физическую сущность данного процесса для рассматриваемого случая можно было бы объяснить неравновесными свойствами природных газов.

Аналогичная картина наблюдается и для фойгтовской трубы, но уже при достижении намного более высокой частоты при значениях  $\omega = 1074 \text{ с}^{-1}$  и выше. Это показывает тесную связь этого явления с выбором модели, учитывающей упруговязкие характеристики материала трубы. Анализ различных кривых для параметра затухания, полученных для фойгтовской и максвелловской моделей при различных значениях параметров релаксации для среды и материала трубы

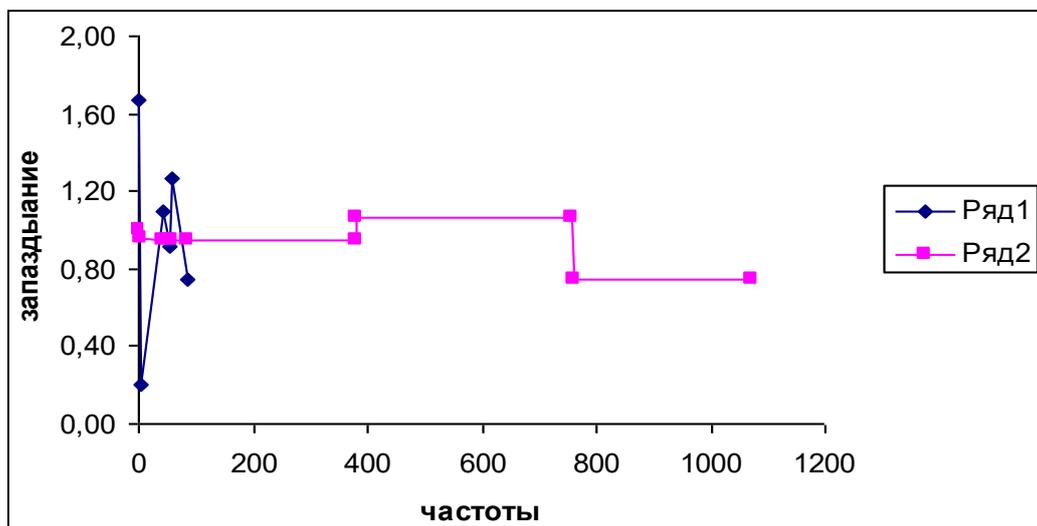
показывает, что при достижении определенного значения дальнейшее возрастание параметра не меняет картины поведения кривой параметра затухания.

С другой стороны анализ кривых на рис. 1 показывает, что для максвелловской модели по сравнению с моделью по Фойгту имеем более крутые ветви кривой, что характеризует более быстрое проявление упруговязких характеристик материала трубы. Анализ кривых для параметра запаздывания на рис. 2 показывает также намного более узкие интервалы изменения частот при проявлении упруговязких характеристик максвелловской трубой по сравнению с фойгтовской.



Ряд 1 – для модели Максвелла; Ряд 2 – для модели Фойгта

Рисунок 1. – Кривая качественного распределения параметра затухания по частотам



Ряд 1 – для модели Максвелла; Ряд 2 – для модели Фойгта

Рисунок 2. – Кривая качественного распределения параметра запаздывания по частотам

Проведенные выше исследования влияния релаксационных параметров среды и материала трубы на характер распространения волн возмущений давления в трубопроводе, позволяют установить важный вывод о том, что затухание происходит в основном за счет времени

релаксации материала трубы. При достижении же определенной частоты дальнейшее нарастание частоты возмущений не вызывает затухания волны.

Вызывает интерес также тот установленный факт, что общая картина затухания возмущений давления в трубе при значениях параметра релаксации материала трубы выше определенного значения, практически не изменяется.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и эксплуатации трубопроводных систем, транспортирующих неравновесные газы с использованием труб из упруговязкого материала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Саттаров Р.М., Исмаилов Р.А. Транспорт газа и вопросы энерго- и ресурсосбережения // Известия высших технических учебных заведений Азербайджана. Нефть и газ. № 6 (16), Баку, 2001, с. 12–14.
2. Исмаилов Р.А., Рагимов А.Р., Рагимов С.А. Применение полиэтиленовых труб в газораспределительных сетях Азербайджана /«Рассохинские чтения», Материалы международного семинара (8-9 февраля 2013 года). В 2 ч., Ч. 2. –Ухта: УГТУ, 2013, с. 156–159.
3. Саттаров Р.М. Неустановившееся движение реологически сложных жидкостей в трубах. Баку: Элм, 1999, 412 с.
4. Wang, Li-Li Chapters 6. One-dimensional visco-elastic waves and elastic-visco-plastic waves / Foundations of stress waves, 2007, pp. 219–264.
5. M. Mitosec, M. Chorzelski Influence of visco-elasticity on pressure wave velocity in polyethylene MDPE pipe / Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, 50(2), pp. 127–140.