

DOI: 10.7242/1999-6691/2013.6.3.41

УДК 539.3:534-18

## АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В ПОДЗЕМНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА

Р.В. Цветков, И.Н. Шардаков, А.П. Шестаков

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия*

Настоящая работа посвящена моделированию динамических процессов, протекающих в подземных газопроводах, что является первым этапом построения системы интеллектуального деформационного мониторинга, позволяющего осуществлять безопасную эксплуатацию контролируемого объекта. С механической точки зрения подземный газопровод представляет собой систему трех взаимодействующих сред: газа, трубы и грунта. При динамических воздействиях, воспринимаемых газопроводом, возникают волновые процессы, которые в каждом из его компонентов существенно отличаются по своим параметрам. На основе анализа численных решений ряда модельных задач установлены закономерности распространения волн в газе, трубе и грунте. Этот анализ позволил определить типы воздействий на газопровод и деформационные параметры, которые наилучшим образом отражают характер волновых процессов в системе и могут быть зафиксированы системой мониторинга.

*Ключевые слова:* мониторинг, подземный газопровод, моделирование, конечные элементы, волны

## ANALYSIS OF WAVE PROPAGATION IN UNDERGROUND GAS PIPELINES IN THE CONTEXT OF THE PROBLEM OF DESIGNING THE INTELLIGENT MONITORING SYSTEMS

R.V. Tsvetkov, I.N. Shardakov and A.P. Shestakov

*Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia*

The study is devoted to modeling of dynamic processes occurring in the underground natural gas pipelines, which is the first stage in the process of designing the intellectual monitoring systems providing their safety operation. From the mechanical viewpoint the underground pipeline is a system of three interacting media: gas, pipe and soil. The pipeline is subjected to the action of various dynamic forces, which initiate wave processes in each of its components. These processes differ essentially in structure and their response to the action of the environment. The analysis of numerical solutions of several model problems has been carried out to estimate the effect of environment on the process of wave propagation in the gas medium and in the pipe. The results of calculations allowed us to determine the types of actions on the pipeline and the deformation parameters, which most closely reflect the wave processes in the system and can be recorded by the monitoring system.

*Key words:* monitoring, underground gas pipeline, modeling, finite elements, waves

### 1. Введение

Уменьшение вероятности возникновения аварийных ситуаций в инженерных сооружениях может быть достигнуто путем постоянного наблюдения за текущим состоянием контролируемого объекта, прогнозированием его поведения во времени на основе полученных результатов измерений и принятием превентивных мер, обеспечивающих безопасность. Современные способы решения этой проблемы связаны с использованием интеллектуальных систем мониторинга. Одна из концепций построения и эксплуатации таких систем приводится в работах [1–3].

Перед системами мониторинга газопроводов ставятся следующие задачи: выявление несанкционированной разгерметизации газопровода [4, 5]; слежение за внутритрубными объектами [6]; проверка функционирования технологических элементов (например, таких как задвижки); определение местоположения тяжелой техники, работающей вблизи газопровода. Общим фактором во всех случаях является возбуждение волновых процессов, регистрация которых дает возможность контролировать состояние газопровода.

Подземный газопровод представляет собой систему трех взаимодействующих между собой компонентов: газа, трубы, грунта. Протекающие в них волновые процессы различны по своей структуре и характеру взаимодействия с окружающей средой. Моделированию распространения волн в подобных системах посвящена обширная библиография. Так, исследование распространения волны по свободной (не взаимодействующей с окружающей средой) трубе проведено еще в 1959 году [7]. Поведение волн в газе без учета механического взаимодействия с трубой описано в [8]. Однако для построения модели волновых процессов в подземном газопроводе необходим комплексный подход, учитывающий взаимовлияние всех компонентов системы. Следует отметить, что в последнее время проблеме взаимодействия волноводов уделяется особое внимание. Так, в работах [9, 10] изучается процесс перераспределения энергий в системе труба – жидкость.

В настоящей статье предложен вариант математической модели волновых явлений в системе магистрального подземного газопровода. Анализ численных решений, полученных на базе этой модели, позволяет исследовать особенности волновых процессов и установить регистрируемые параметры системы мониторинга, а также выбрать типы и характеристики измеряющих их датчиков.

## 2. Математическая модель

Объектом моделирования является прямолинейный участок газопровода, рассматриваемый в цилиндрической системе координат. Предполагается, что этот участок, а также все волновые процессы в нем обладают осевой симметрией. Влияние свободной поверхности грунта не учитывается. Возбуждение осесимметричного волнового процесса в трубе обеспечивается заданием ненулевых начальных скоростей на так называемом «разгонном блоке» — узкой кольцевой области, расположенной на правом конце трубы. В газе волновой процесс вызывается импульсом давления, приложенным к правой границе области газа. Эти допущения позволяют решать задачу в осесимметричной постановке.

Расчетная схема системы газ – трубопровод – грунт приведена на рисунке 1. Здесь:  $V_g, V_t, V_s$  — области, занимаемые, соответственно, газом, металлической стенкой трубы и грунтом;  $t_g, t_s$  — принимаемые в расчет толщины слоев газа и грунта;  $t_t$  — толщина стенки трубы;  $R$  — внутренний радиус трубы;  $L$  — длина рассматриваемого участка;  $L_{sb}$  — длина разгонного блока;  $r, z$  — оси цилиндрической системы координат.

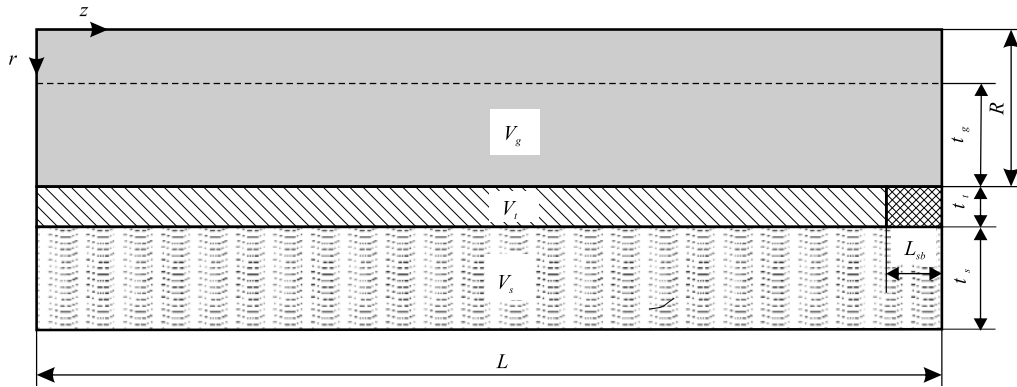


Рис. 1. Расчетная схема системы газ–трубопровод–грунт

Материалы трубы и грунта полагаются упругими и изотропными [11], и для них выполняются следующие соотношения:

– геометрические

$$\varepsilon_{ij}(\mathbf{x}, t) = (U_{i,j}(\mathbf{x}, t) + U_{j,i}(\mathbf{x}, t)) / 2, \quad \mathbf{x} \in V_t \cup V_s; \quad (1)$$

– физические

$$\sigma_{ij}(\mathbf{x}, t) = 2G(\mathbf{x})\varepsilon_{ij}(\mathbf{x}, t) + \lambda(\mathbf{x})\delta_{ij}\varepsilon_{kk}(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x} \in V_t \cup V_s, \quad (2)$$

$$G(\mathbf{x}), \lambda(\mathbf{x}) = \begin{cases} G_t, \lambda_t, & \mathbf{x} \in V_t, \\ G_s, \lambda_s, & \mathbf{x} \in V_s. \end{cases}$$

Здесь:  $t$  — время;  $\mathbf{x}$  — радиус-вектор произвольной точки;  $U_{i,j}(\mathbf{x}, t)$  — производная  $i$ -й компоненты вектора перемещений  $\mathbf{U}(\mathbf{x}, t)$  по координате  $x_j$ ;  $\varepsilon_{ij}, \sigma_{ij}$  — компоненты тензоров деформаций и напряжений;  $G_t, \lambda_t, G_s, \lambda_s$  — физические параметры Ламе для трубы и грунта;  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера.

Математическая постановка задачи, кроме уравнений (1) и (2), включает:

– уравнение движения твердого тела

$$\sigma_{ij,j}(\mathbf{x}, t) = \rho(\mathbf{x}) \frac{\partial^2 U_i(\mathbf{x}, t)}{\partial t^2}, \quad \mathbf{x} \in V_t \cup V_s, \quad (3)$$

где функция плотности имеет вид:

$$\rho = \begin{cases} \rho_g, & \mathbf{x} \in V_g, \\ \rho_t, & \mathbf{x} \in V_t, \\ \rho_s, & \mathbf{x} \in V_s; \end{cases} \quad (4)$$

– волновое уравнение газа [12]

$$c^2 \Delta P(\mathbf{x}, t) - \frac{\partial^2 P(\mathbf{x}, t)}{\partial t^2} = 0, \quad \mathbf{x} \in V_g, \quad (5)$$

где  $c$  — скорость звука в газе;  $\Delta$  — оператор Лапласа;  $P(\mathbf{x}, t)$  — давление в газе.

В рассматриваемой математической постановке задаются следующие граничные условия:  
– для грунта и трубы

$$\sigma_r = 0, \quad \sigma_{rz} = 0, \quad r = (R + t_t + t_s), \quad (6)$$

$$\sigma_z = 0, \quad \sigma_{rz} = 0, \quad z = L, \quad r \in [R, R + t_t + t_s],$$

$$U_r = 0, \quad U_z = 0, \quad z = 0, \quad r \in [R, R + t_t + t_s]; \quad (7)$$

– для газа

$$\frac{\partial P}{\partial z} = 0, \quad z = 0, \quad r \in [R - t_g, R],$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} = 0, \quad r = R - t_g, \quad (8)$$

$$P = P^*(t), \quad z = L, \quad r \in [R - t_g, R];$$

– условие на контактной границе газ – труба ( $r = R$ )

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial r} &= -\rho_g \frac{\partial^2 U_r^2}{\partial t^2}, \\ \sigma_{rz} &= 0, \\ \sigma_r &= P; \end{aligned} \quad (9)$$

– условие на контактной границе труба – грунт ( $r = R + t_t$ )

$$(\sigma_{rz})_t = (\sigma_{rz})_s, \quad (\sigma_{rr})_t = (\sigma_{rr})_s \quad (10)$$

и начальные условия ( $t = 0$ ):

– для газа

$$P = 0, \quad \partial P / \partial t = 0, \quad r \in [R - t_g, R]; \quad (11)$$

– для трубы

$$\begin{aligned} U_z &= 0, \quad U_r = 0, \quad r \in [R, R + t_t], \\ \partial U_z / \partial t &= 0, \quad \partial U_r / \partial t = 0, \quad z \in [0, L - L_{sb}], \quad r \in [R, R + t_t], \\ \partial U_z / \partial t &= V_z^*, \quad \partial U_r / \partial t = V_r^*, \quad z \in [L - L_{sb}, L], \quad r \in [R, R + t_t]; \end{aligned} \quad (12)$$

– для грунта

$$U_z = 0, \quad U_r = 0, \quad \partial U_z / \partial t = 0, \quad \partial U_r / \partial t = 0, \quad r \in [R + t_t, R + t_t + t]. \quad (13)$$

Здесь:  $P^*(t)$  — функция давления, задаваемая на правой границе области газа;  $V_z^*, V_r^*$  — компоненты начальной скорости разгонного блока.

### 3. Результаты решения модельных задач

Решение исходной системы (1)–(13) осуществлено на основе соответствующей вариационной формулировки с использованием метода взвешенных невязок [13]. Для численной реализации применены известные процедуры метода конечных элементов [14].

Далее на основе численных решений проведен анализ волновых процессов в газопроводе. Решен ряд модельных задач, в каждой из которых выбирались пространственная и временная дискретизации. Степень дискретизации устанавливалась путем численных экспериментов; за приемлемый уровень дискретизации принимался вариант конечно-элементной сетки, обеспечивающий при пятикратном измельчении сетки отличие по амплитудам ускорений не хуже, чем 4%.

#### 3.1. Распространение волн в свободном трубопроводе

Расчет волнового процесса в свободном трубопроводе выполнен в рамках математической постановки (1)–(13) при условии равенства нулю всех свойств, соответствующих газу и грунту. Особенности распространения волны в трубе, не взаимодействующей с окружающей средой, определялись при следующих значениях физических и геометрических параметрах трубы:  $\lambda_t = 1,15 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ ;  $G_t = 0,77 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ ;  $\rho_t = 7800 \text{ кг/м}^3$ ;  $R = 0,71 \text{ м}$ ;  $t_t = 18,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $L = 1000 \text{ м}$ ;  $L_{sb} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ .

В трубе, как в волноводе, в зависимости от направления внешнего возмущения могут реализоваться как продольные, так и изгибные волны. Для возбуждения изгибных волн начальная скорость разгонного блока должна быть направлена по радиальной координате. Компоненты вектора начальной скорости считались равными  $V_r^* = 10 \text{ м/с}$ ,  $V_z^* = 0 \text{ м/с}$ . В различных точках оси  $z$  на основе численного анализа построены виброграммы радиальной компоненты вектора ускорений, которые подвергались частотной фильтрации с помощью прямого и обратного преобразований Фурье. Из частотного диапазона выделялся диапазон  $[0 \dots 2000] \text{ Гц}$ .

Распределение максимальной амплитуды нормальной компоненты ускорения по длине трубы ( $A_r$ ) приведено на рисунке 2. Для того чтобы количественно охарактеризовать скорость уменьшения сигнала, вводится коэффициент затухания  $D_{100}$ , который определяет, во сколько раз падает амплитуда при прохождении сигналом первых 100 м от места его возбуждения. Эта безразмерная характеристика позволяет сравнивать затухание различных волновых процессов. В данном случае коэффициент затухания нормальной компоненты ускорения составляет  $D_{100}^r = 5,5$ .

Уменьшение амплитуды сигнала обусловлено дисперсией изгибной волны. Наглядно этот процесс иллюстрирует вейвлет-образ виброграммы (Рис. 3), по которому видно, что волны разной частоты, стартующие при начальном возмущении одновременно, достигают определенной точки пространства в разное время (что объясняется различием фазовых скоростей для волн разных частот). Из этого же графика следует, что в системе реализуются только волны с частотами выше определенного значения (в данном случае  $\geq 1100 \text{ Гц}$ ).

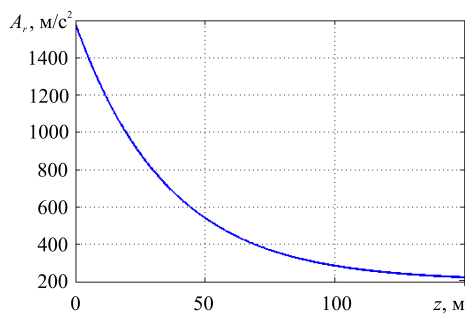


Рис. 2. Падение амплитуды нормальной компоненты ускорения по длине трубопровода

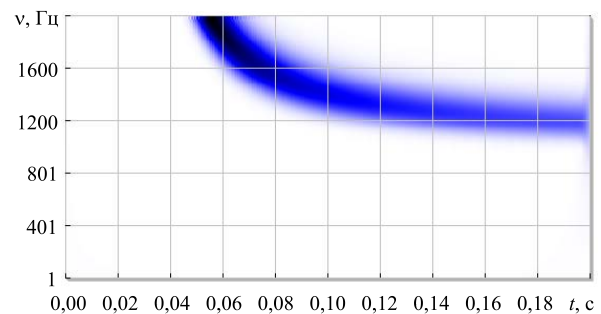


Рис. 3. Вейвлет-образ нормальной компоненты виброускорения на расстоянии 50 м от места удара;  $v$  – частота сигнала

Для возбуждения продольных волн в трубе начальная скорость разгонного блока должна быть направлена вдоль трубы ( $V_r^* = 0 \text{ м/с}$ ,  $V_z^* = 10 \text{ м/с}$ ). Фильтрация продольных волн осуществляется с частотой пропускания в диапазоне  $[0 \dots 1000] \text{ Гц}$ . Распределение значений амплитуды продольной компоненты ускорения ( $A_z$ ) по длине трубы показаны на рисунке 4. Из этой зависимости получено значение коэффициента затухания  $D_{100}^z = 1,7$ . Вейвлет-образ продольной компоненты виброускорения представлен на рисунке 5.

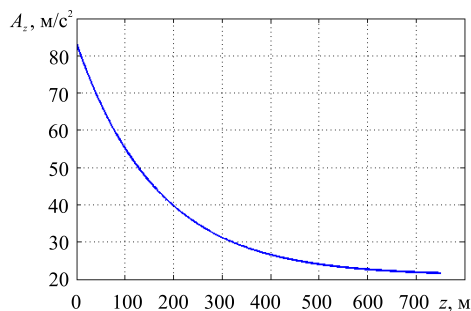


Рис. 4. Падение амплитуды продольной компоненты ускорения по длине трубопровода

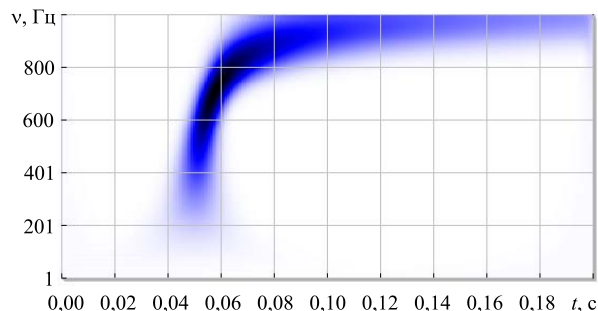


Рис. 5. Вейвлет-образ продольной компоненты виброускорения на расстоянии 250 м от места удара;  $\nu$  – частота сигнала

Полученное различие коэффициентов затухания продольной и поперечной волн объясняется высокой дисперсией изгибных волн, которая приводит к «размыванию» волнового пакета и, как следствие, быстрому убыванию амплитуды. У продольной волны высокая дисперсия наблюдается только в диапазоне частот от [600...1000] Гц; ниже 600 Гц дисперсия стремительно уменьшается до нуля, что обеспечивает слабое затухание продольной волны на низких частотах. Так как продольная волна подвержена затуханию менее, чем изгибная, то для анализа взаимодействия трубы с газом и грунтом целесообразно рассматривать только продольную волну.

### 3.2. Распространение волн по трубопроводу в системе «газ – труба»

Расчет распространения продольной волны с учетом взаимодействия газа с трубой выполнен при тех же параметрах, что и в предыдущем разделе. Внешним воздействием является начальная скорость разгонного блока трубы  $V_z^* = 10$  м/с. Газ имел следующие свойства:  $c = 360$  м/с,  $t_g = 0,178$  м,  $\rho_g = 48,7$  кг/м<sup>3</sup>. Для иллюстрации взаимодействия трубы и газа построены изополя продольных напряжений  $\sigma_{zz}$  для трубы и давления  $P$  для газа. На рисунке 6, а изображено распределение напряжения  $\sigma_{zz}$ , соответствующее продольной волне в трубе, а на рисунке 6, б — давление  $P$  в газе, порождаемое колебаниями трубы. Из полученных результатов следует, что для продольной компоненты ускорения поверхности трубы коэффициент затухания составляет  $D_{100}^z = 1,9$ . Эта величина превосходит коэффициент затухания «свободной» трубы ( $D_{100}^z = 1,7$ ), что объясняется оттоком энергии из трубы в газ. Однако увеличение коэффициента затухания незначительно, поэтому можно заключить, что газ не оказывает существенного влияния на процесс распространения продольной волны по трубе.

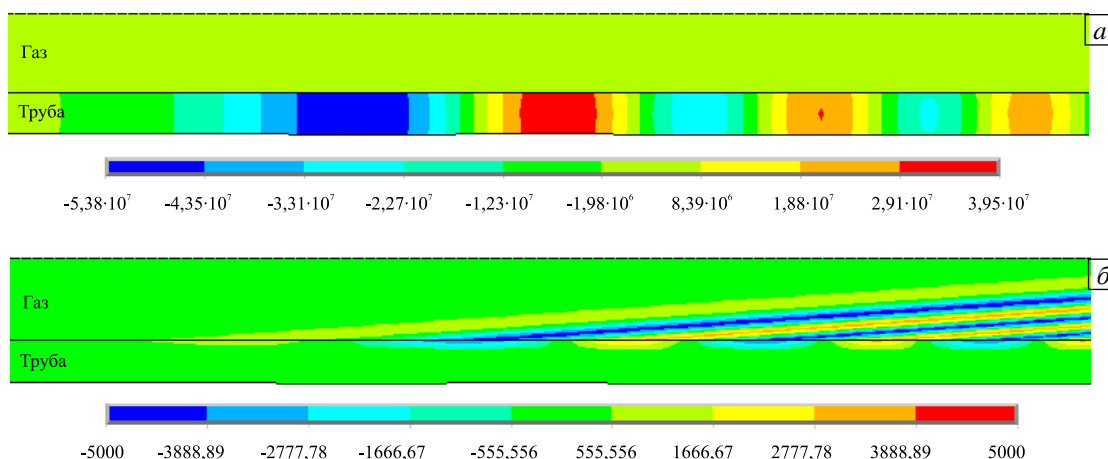


Рис. 6. Продольное напряжение в трубе  $\sigma_{zz}$ , Па (а) и давление в газе  $P$ , Па (б) при распространении волн по трубе

### 3.3. Распространение волн по трубопроводу в системе «труба-грунт»

В данном разделе рассматривается задача взаимодействия трубы с грунтом. Как и в задаче подраздела 3.2, внешним воздействием является начальная скорость разгонного блока трубы  $V_z^* = 10$  м/с. Физико-

механические и геометрические параметры грунта были следующими:  $\lambda_s = 90 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ ;  $G_s = 22,5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ ;  $\rho_s = 2500 \text{ кг/м}^3$ ;  $t_s = 0,3 \text{ м}$ . Анализ результатов решения этой задачи позволяет оценить влияние грунта на процесс распространения волны по трубе.

На рисунке 7 приведено распределение интенсивности напряжений  $\sigma_i$  по объему трубы и грунта в фиксированный момент времени. На рисунке 7, а изображена полная картина распределения интенсивности напряжений; она охватывает интервал значений от 0 до  $2 \cdot 10^7 \text{ Па}$ . Рисунок 7, б демонстрирует особенности распределения интенсивности напряжений в интервале от 0 до  $10^4 \text{ Па}$ ; все значения за пределами этого диапазона показаны серым цветом. Такое представление результатов позволяет наглядно продемонстрировать эффект взаимодействия трубы с грунтом, следствием которого является отток энергии из трубы в грунт и падение амплитуды волны. Это неизбежно отражается на величине коэффициента затухания продольной компоненты ускорения поверхности трубы. Его величина составляет  $D_{100}^z = 43210$ , что на 4 порядка больше соответствующего значения при взаимодействии трубы с газом ( $D_{100}^z = 1,9$ ). Таким образом, грунт оказывает доминирующее влияние на процесс распространения волны по трубе (см. подраздел 3.2).

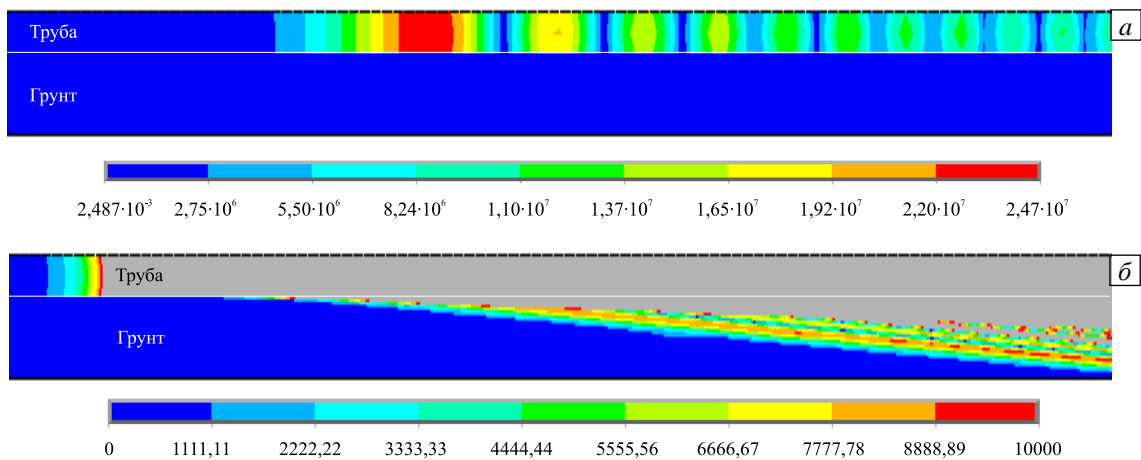


Рис. 7. Поле интенсивности напряжений  $\sigma_i$ , Па в системе труба – грунт при распространении продольной волны по трубе в полном диапазоне значений (а) и в диапазоне  $[0 \dots 2 \cdot 10^7]$  Па (б)

### 3.4. Распространение волн по газу

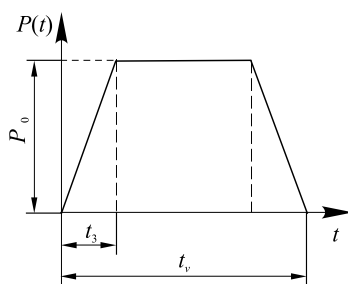


Рис. 8. Форма импульса давления, прикладываемого к газу ( $P_0 = 1000 \text{ Н/м}^2$ ;  $t_1 = 0,37 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ ;  $t_v = 1,11 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ )

Анализ распространения волн в газе с учетом его взаимодействия с трубой выполнен при нулевых начальных условиях и приложении трапецидального импульса давления  $P^*(t)$  на правой границе области, занятой газом. Форма импульса давления представлена на рисунке 8. В данном случае принимаемая в расчет толщина слоя газа  $t_g$  равняется внутреннему радиусу трубы.

На рисунке 9 изображено распределение давления в газе в момент времени, когда импульс давления, приложенный на правой границе трубы, прошел расстояние, равное  $1/3$  рассматриваемой длины трубопровода. На рисунке видно, что в месте прохождения импульса давления газ локально деформирует стенку трубы, что неизбежно сказывается на ускорении ее поверхности в этом месте. Следовательно, локализованное место прохождения импульса в газе можно регистрировать по измерению виброускорения на поверхности трубы. Анализ результатов позволил установить величину коэффициента затухания виброускорения на поверхности трубы при прохождении импульса в газе  $D_{100}^r = 1,98$ .

В рамках проведенного цикла численных экспериментов была решена задача исследования прохождения импульса давления по газу с учетом взаимодействия газа с трубой и грунтом. Учет влияния грунта приводит к увеличению коэффициента затухания виброускорения до значения  $D_{100}^r = 2,7$ . Увеличение коэффициента затухания обусловлено дополнительным оттоком энергии газа в грунт.

На основе полученных результатов сделан вывод, что при прохождении импульса давления по газу имеется возможность его регистрации (как величины, так и местоположения) по измерению радиальной компоненты виброускорения на поверхности трубы. При этом влияние грунта на процесс затухания амплитуды радиальной компоненты виброускорения на внешней поверхности трубы оказывается не очень значимым. Это обстоятельство позволяет фиксировать распространяющиеся по газу возмущения на существенных расстояниях (порядка километров).

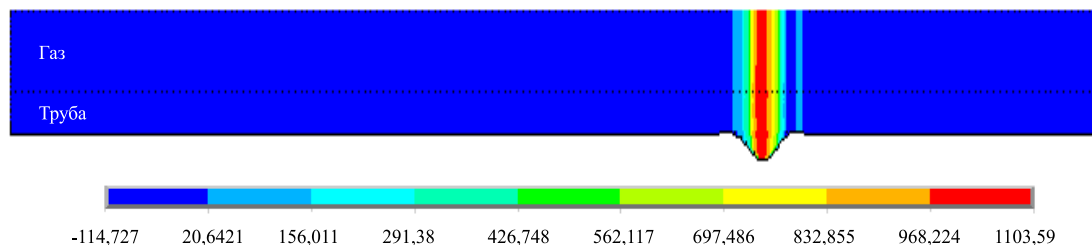


Рис. 9. Давление  $P$ , Па в газе при распространении волны по газу в системе газ – труба (пунктирная линия обозначает границу контакта газа с трубой)

### 3.5. Анализ энергетического обмена между газом и трубой при установившихся гармонических колебаниях

Рассматривается деформационное взаимодействие газа с трубой при условии внешнего гармонического воздействия на газ в виде давления  $P^*(t) = P_0 \cdot \sin(2\pi\nu t)$ , приложенного к поперечному сечению трубопровода. Амплитуда колебаний давления  $P_0$  составляет 1000 Па, а циклическая частота воздействия  $\nu$  принимает значения от 1 до 5000 Гц. Величина отношения полной энергии в газе [12] к полной энергии в трубе [11]  $k = E_g/E_t$  изображена на рисунке 11. Под полной энергией понимается сумма кинетической и потенциальной энергий соответствующей среды.

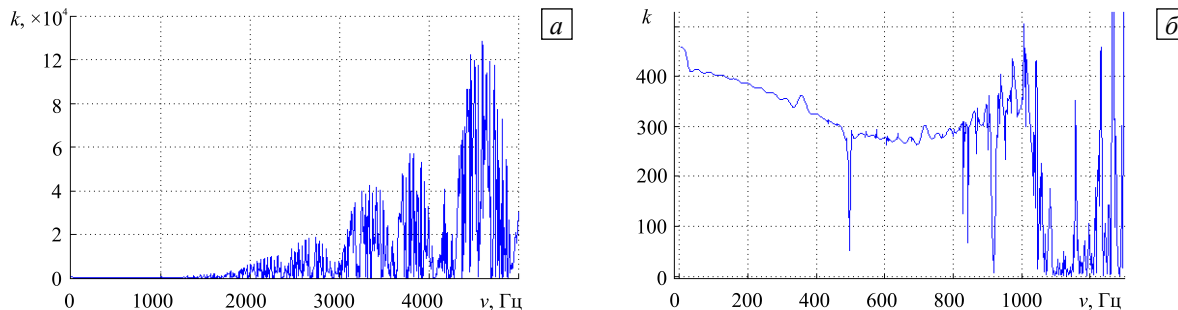


Рис. 10. Отношение энергии газа к энергии трубы при колебаниях системы газ – труба: общая закономерность (а) и начальный участок в диапазоне частот от 1 до 1300 Гц в увеличенном масштабе (б)

Согласно рисунку 11, б в диапазоне частот от 0 до 600 Гц с ростом частоты коэффициент  $k$  убывает, то есть увеличивается доля энергии, уходящей в трубу, и, как следствие, распространяющаяся по газу волна затухает интенсивнее (пропускная способность газовой среды уменьшается). В диапазоне от 600 до 1000 Гц наблюдается рост коэффициента  $k$ ; интенсивность затухания волны в газе ослабевает (пропускная способность газовой среды увеличивается). В диапазоне от 1000 до 1100 Гц происходит быстрое убывание коэффициента  $k$  и, соответственно, увеличение коэффициента затухания  $D_{100}$ . Из рисунка 11, а видно, что с ростом частоты от 1300 до 5000 Гц, среднее значение коэффициента  $k$  значительно возрастает, а величина коэффициента  $D_{100}$  падает. Такая закономерность изменения  $k$  объясняется тем, что при увеличении частоты длина волны уменьшается, и при достижении ею значения много меньше толщины трубы взаимодействием между трубой и газом можно пренебречь, поскольку модули и плотности этих сред сильно отличаются. И вследствие того, что на высоких частотах большая часть энергии находится в газе, зафиксировать колебания давления газа путем измерения виброускорений стенки трубы практически невозможно. Поэтому для регистрации высокочастотных сигналов в газе целесообразно измерять давление в газовой среде.

#### 4. Заключение

Построенная математическая модель и ее численная реализация позволили проанализировать характерные особенности деформационных волновых процессов в системе трубопровода, представляющего собой заполненную газом металлическую трубу, взаимодействующую по внешней поверхности с грунтом.

На основе полученных результатов сделаны следующие выводы.

1. Для свободного трубопровода (не заполненного газом и не взаимодействующего с грунтом) установлено большое различие коэффициентов затухания амплитуд ускорений продольной ( $D_{100}^z = 1,7$ ) и поперечной ( $D_{100}^r = 5,5$ ) волн. Этот факт объясняется высокой дисперсией изгибных волн, которая приводит к «размыванию» волнового пакета и, как следствие, быстрому убыванию амплитуды волны. У продольной волны высокая дисперсия наблюдается только в диапазоне высоких частот; на низких частотах дисперсия уменьшается, что обеспечивает слабое затухание продольной волны.
2. Для трубопровода, заполненного газом (не взаимодействующего с грунтом) и испытывающего воздействие разгонного блока с начальной скоростью  $V_z^* = 10$  м/с, коэффициент затухания амплитуды продольного ускорения составляет  $D_{100}^z = 1,9$ . Из этого следует, что газ не оказывает существенного влияния на процесс распространения продольной волны по трубе при внешнем воздействии на нее.
3. Для трубопровода, взаимодействующего с грунтом и испытывающего воздействие разгонного блока с начальной скоростью  $V_z^* = 10$  м/с, установлено наличие сильного оттока энергии из трубы в грунт и, как следствие, существенное возрастание коэффициента затухания амплитуды продольного ускорения до величины  $D_{100}^z = 43210$ , что на 4 порядка больше соответствующего значения при взаимодействии трубы с газом.
4. Для трубопровода, заполненного газом и испытывающего локализованный импульс давления на газ в одном из поперечных сечений, установлено, что при прохождении импульса давления по газу имеется возможность его регистрации (как величины, так и местоположения) по измерению радиальной компоненты виброускорения на поверхности трубы. Коэффициент затухания виброускорения на поверхности трубы составляет  $D_{100}^r = 1,97$  при отсутствии взаимодействия с грунтом и  $D_{100}^r = 2,7$  с его учетом. Это обстоятельство позволяет фиксировать распространяющиеся по газу возмущения на значительных расстояниях от источника (порядка километров).
5. Для трубопровода, заполненного газом и испытывающего внешнее гармоническое воздействие на газ в виде давления, приложенного к правой границе области, занятой газом, установлены закономерности изменения коэффициента  $k$ , равного отношению полной энергии газа к полной энергии трубы, от частоты изменения давления. В диапазоне частот от 0 до 1000 Гц коэффициент  $k$  имеет значения  $\sim 10^2$ , что свидетельствует о переходе большей доли энергии от газа к трубе. Таким образом, вибрационные процессы в газе можно регистрировать путем измерения уровней виброускорений на стенках трубы. В диапазоне частот от 1000 до 5000 Гц коэффициент  $k$  возрастает до значений  $\sim 10^4 - 10^5$ , и это указывает на то, что практически вся энергия локализуется в самом газе, а энергия, идущая на вибрационные процессы в трубе мала. Отсюда следует, что вибрационные процессы в газе в данном частотном диапазоне нужно измерять непосредственно в газе, и нет смысла регистрировать колебания стенок трубы.

Сделанные выводы имеют решающее значение на этапе разработки и создания автоматизированной системы деформационного мониторинга протяженных магистральных трубопроводов. Они позволяют для конкретной задачи мониторинга оценить, какие параметры следует измерять, какой точностью и чувствительностью должны обладать измерительные приборы, с какой дискретностью они должны располагаться на объекте наблюдения.

В качестве примера хотелось бы отметить, что одной из задач, возникающих при технологических операциях с газопроводом, является определение положения внутритрубных объектов (например, скребков, используемых при очистке трубы). Решение именно такой задачи описано в [6], где предполагается, что при прохождении скребком сварного шва возмущается волновой процесс в трубе, который распространяется на значительные расстояния, и сигнал фиксируется приемной аппаратурой на поверхности трубы. Опираясь на результаты, полученные в настоящей работе, можно заключить, что предположение авторов [6] ошибочно, поскольку волна, распространяющаяся в трубе, окруженной грунтом, на каждых 100 м затухает на четыре порядка. Скорее всего, скребок, задевая сварной шов, замедляет свое движение и тем самым провоцирует колебания газа, которые могут распространяться на расстояния порядка 25 км, вызывая колебания поверхности трубы.

При разгерметизации трубопровода происходит истечение газа в окружающую среду. Этот процесс сопровождается высокочастотными колебаниями газа, которые слабо затухают при распространении



по трубопроводу. Однако их регистрация на поверхности трубы невозможна, поскольку газ практически не взаимодействует с трубой. Таким образом, сигналы следует фиксировать, измеряя колебания не на поверхности трубы, а в газовой среде.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-01-33042-мол\_а\_вед и проект № 13-08-96069 -р\_урал\_а).

## Литература

1. *Богоявленская В.А.* Математическое моделирование деформационных процессов земной поверхности в районах вулканической деятельности для организации мониторинга // Вестник ННГУ. – 2011. – № 4-2. – С. 394-395.
2. *Цветков Р.В., Шардаков И.Н., Шестаков А.П.* Система мониторинга неравномерных осадок сооружений с использованием ip-камер // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. унив. Сер.: Стр-во и архит. – 2013. – № 30(49). – С. 95-101.
3. *Цветков Р.В., Шардаков И.Н.* Моделирование деформационных процессов в системе «грунтовое основание – фундамент – здание» при наличии карстовых явлений // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2010. – Т. 3, № 3. – С. 102-106. DOI
4. *Кутуков С.Е.* Проблема повышения чувствительности, надежности и быстродействия систем обнаружения утечек в трубопроводах // Нефтегазовое дело. – 2004. – Т. 2, № 1. – С. 29-45. (URL: <http://www.ngdelo.ru/2004/29-45.pdf>).
5. *Султанов Р.Г., Уразов Р.Г., Мугафаров М.Ф.* О повышении точности определения места повреждения трубопровода // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – № 3. – С. 128-135. (URL: [http://www.ogbus.ru/authors/SultanovRG/SultanovRG\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/SultanovRG/SultanovRG_1.pdf)).
6. *Бочкарев Н.Н., Курочкин А.А.* Вибродиагностический контроль движения внутритрубных объектов в магистральных газопроводах // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – № 5. – С. 86-98. (URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Bochkarev/Bochkarev\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Bochkarev/Bochkarev_1.pdf)).
7. *Gazis D.C.* Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. I. Analytical foundation // J. Acoust. Soc. Am. – 1959. – V. 31, N. 5. – P. 568-573. DOI
8. *Стретт Дж.В. (лорд Рэлей)* Теория звука. Т. 2. – М.: ГИТТЛ, 1955. – 476 с.
9. *Филиппенко Г.В.* Энергетические аспекты осесимметричного распространения волн в бесконечной цилиндрической оболочке, полностью погруженной в жидкость // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2013. – Т. 6, № 2. – С. 187-197. DOI
10. *Kwak M.K.* Free vibration analysis of a finite circular cylindrical shell in contact with unbounded external fluid // J. Fluid. Struct. – 2010. – V. 26, N. 3. – P. 377-392. DOI
11. *Новацкий В.* Теория упругости. – М.: Мир, 1970. – 256 с.
12. *Гринченко В.Т., Вовк И.В., Мацыпура В.Т.* Основы акустики. – Киев: Наукова думка, 2009. – 640 с.
13. *Михлин С.Г.* Вариационные методы в математической физике. – М.: Физматгиз, 1970. — 512 с.
14. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 543 с.

Поступила в редакцию 16.09.13; опубликована в электронном виде 15.10.13

---

## Сведения об авторах

*Цветков Роман Валерьевич*, ктн, нс, Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, Пермь, ул. Академика Королёва, д. 1; E-mail: [flower@gmail.com](mailto:flower@gmail.com)

*Шардаков Игорь Николаевич*, дфмн, проф., зав.лаб., ИМСС УрО РАН; E-mail: [shardakov@icmm.ru](mailto:shardakov@icmm.ru)

*Шестаков Алексей Петрович*, мнс., ИМСС УрО РАН; E-mail: [shap@icmm.ru](mailto:shap@icmm.ru)

## Bibliography

1. *Bogoyavlenskaya V.A.* Matematicheskoe modelirovanie deformatsionnykh protsessov zemnoi poverkhnosti v raionakh vulkanicheskoi deyatelnosti dlya organizatsii monitoringa // Vestnik NNGU. – 2011. – N. 4-2. – S. 394-395.
2. *Tsvetkov R.V., Shardakov I.N., Shestakov A.P.* Sistema monitoringa neravnomernykh osadok sooruzhenii s ispol'zovaniem ip-kamer // Vestnik Volgogr. gos. arkhitekt.-stroit. Univ. Ser.: Str-vo i arkhitekt. – 2013. – N. 30(49). – S. 95-101.
3. *Tsvetkov R.V., Shardakov I.N.* Modelirovanie deformatsionnykh protsessov v sisteme «gruntovoe osnovanie-fundament-zdanie» pri nalichii karstovykh yavlenii // Vychisl. mekh. splosh. sred. – 2010. – T. 3, N. 3. – S. 102-106. DOI
4. *Kutukov S.E.* Problema povysheniya chuvstvitelnosti, nadezhnosti i bystrodeistviya sistem obnaruzheniya utechek v truboprovodakh // Neftegazovoe delo. – 2004. – T. 2, N. 1. – S. 29-45. (URL: <http://www.ngdelo.ru/2004/29-45.pdf>).
5. *Sultanov R.G., Urazov R.G., Mugafarov M.F.* O povyshenii tochnosti opredeleniya mesta povrezhdeniya truboprovoda // Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo». – 2012. – N. 3. – S. 128-135. (URL: [http://www.oqbus.ru/authors/SultanovRG/SultanovRG\\_1.pdf](http://www.oqbus.ru/authors/SultanovRG/SultanovRG_1.pdf)).
6. *Bochkarev N.N., Kurochkin A.A.* Vibrodiagnosticheskiy kontrol' dvizheniya vnutritrubnykh ob'ektov v magistral'nykh gazoprovodakh // Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo». – 2012. – N. 5. – S. 86-98. (URL: [http://www.oqbus.ru/authors/Bochkarev/Bochkarev\\_1.pdf](http://www.oqbus.ru/authors/Bochkarev/Bochkarev_1.pdf)).
7. *Gazis D.C.* Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. I. Analytical foundation // J. Acoust. Soc. Am. – 1959. – V. 31, N. 5. – P. 568-573. DOI
8. *Strett Dzh.V. (lord Relei)* Teoriya zvuka. T. 2. – M.: GITTL, 1955. – 476 s.
9. *Filippenko G.V.* Energeticheskie aspekty osesimmetrichnogo rasprostraneniya voln v beskonechnoi tsilindricheskoi obolochke, polnost'yu pogruzhennoi v zhidkost' // Vychisl. mekh. splosh. sred. – 2013. – T. 6, N. 2. – S. 187-197. DOI
10. *Kwak M.K.* Free vibration analysis of a finite circular cylindrical shell in contact with unbounded external fluid // J. Fluid. Struct. – 2010. – V. 26, N. 3. – P. 377-392. DOI
11. *Novatskii V.* Teoriya uprugosti. – M.: Mir, 1970. – 256 s.
12. *Grinchenko V.T., Vovk I.V., Matsypura V.T.* Osnovy Akustiki. – Kiev: Naukova dumka, 2009. – 640 s.
13. *Mikhlin S.G.* Variatsionnye metody v matematicheskoi fizike. – M.: Fizmatgiz, 1970. – 512 s.
14. *Zenkevich O.* Metod konechnykh elementov v tekhnike. – M.: Mir, 1975. – 543 s.