

ISSN 1562-2983
ISSN 1994-8484



ВЕСТНИК

ТЮМЕНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

№ 4/2012 Физико-математические науки.
Информатика

Журнал издается
с 1998 года

Свидетельство о регистрации № 017335
выдано 20 марта 1998 г. Комитетом РФ по печати

Издание включено в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов, выпускаемых в Российской Федерации, в которых публикуются основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Г.Ф. Шафранов-Куцев, д. филос. н., проф., чл.-корр. РАО

Заместители главного редактора:

А.Д. Шалабодов, д. б. н., проф.

М.Н. Щербинин, д. филос. н., проф.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

М.М. Акулич, д. социол. н., проф.
Н.Н. Белозерова, д. филол. н., проф.
Е.Г. Белякова, д. пед. н., проф.
О.Ю. Винниченко, д. ю. н., проф.
С.Н. Гашев, д. биол. н., проф.
А.П. Горн, д.э.н. доц.
Е.Л. Доценко, д. психол. н., проф.
А.Г. Еманов, д. и. н., проф.
В.И. Загвязинский, д. пед. н., акад. РАО
А.Н. Зайцева, д. э. н., проф.
В.В. Козин, д. г. н., проф.
Е.А. Короткова, д. пед. н., проф.
В.Н. Кутрунов, д. ф.-м. н., проф.
Т.И. Моисеенко, д. биол.н., чл.-корр. РАН
Л.П. Паничева, д. х. н., проф.
В.С. Соловьев, д. м. н., проф.
Н.К. Фролов, д. филол. н., проф.
А.Б. Шабаров, д. т. н., проф.
Н.А. Шелпакова, к. х. н., доц.
Л.С. Усова — ответственный секретарь

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ

«ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ.
ИНФОРМАТИКА»

Научные редакторы:

А.Б. Шабаров, д. т. н, проф.
В.Н. Кутрунов, д. ф.-м. н, проф.
А.А. Вакулин, д. т. н, проф.,
А.А. Губайдуллин, д. ф.-м. н, проф.,
А.А. Кислицын, д. ф.-м. н, проф.,
Г.В. Бахмат, к. т. н, проф.,
Ю.В. Пахаруков, д. ф.-м. н, проф.,
Л.П. Семихина, д. ф.-м. н, проф.,
Э.А. Аринштейн, д. ф.-м. н, проф.,
Т.Г. Латфуллин, д. ф.-м. н, проф.,
В.Е. Мосягин, к. ф.-м. н, доц.,
А.А. Захаров, д. т. н, проф.,
А.Г. Ивашко, д. т. н, проф.,
Т.В. Мальцева, д. ф.-м. н, проф.



© ФГБОУ ВПО Тюменский государственный университет, 2012

В НОМЕРЕ:

ФИЗИКА

Филиппов А.И., Ахметова О.В., Родионов А.С.

Асимптотическое осреднение температуры турбулентного потока в скважине6

Косяков В.П., Родионов С.П.

Определение наилучшего варианта расстановки галереи скважин в зонально-неоднородном пласте с учетом теплофизических свойств флюидов на основе аналитического решения14

Соколюк Л.Н., Родионов С.П.

Метод расчета наилучшего варианта объединения слоев геологической модели на основе минимизации погрешности апскейлинга22

Зубков П.Т., Яковенко А.В.

Тепловое и динамическое воздействие газа на границы вибрирующей области29

Аринштейн Э.А., Кириллов Ю.Д.

Промерзание влажного грунта (2). Метод последовательных приближений34

Аксенов Б.Г., Карякина С.В.

Моделирование нестационарного теплообмена в конструкциях из многослойных каркасных панелей38

Вакулин А.А., Аксенов Б.Г., Татосов А.В., Вакулин А.А.

Измерение расхода многофазного потока дисперсной структуры42

Шмидберская А.А., Удовиченко С.Ю.

Исследование нестационарных температурных полей при воздействии остророфокусированного пучка тяжелых ионов на плоские двухслойные мишени47

Григорьев Б.В., Шабаров А.Б.

Экспериментальное исследование промерзания-оттаивания грунтов в неравновесных условиях53

Кутрунов В.Н., Михайлов П.Ю., Пульдас Л.А., Вакулин А.А., Вилков М.Н.

Экспериментальное исследование и физико-математическое моделирование процесса остывания нефти в подземном трубопроводе61

Ивашко А.Г., Захаров А.А., Карякин И.Ю.

Прогнозирование прокаливаемости стали на основе уравнения теплопроводности68

Шабаров А.Б., Вакулин А.А., Захаров А.А., Семихина Л.П., Саранчин Н.В., Вакулин А.А., Саранчин С.Н.

Измерительно-вычислительная система диагностики параметров течения и теплообмена многофазной смеси в скважинах и трубопроводах74

Кузнецова Е.И.

Фильтрация жидкости в двухзонном трещиновато-пористом пласте80

МАТЕМАТИКА

Дегтев А.Н.

Несколько вопросов о сводимостях вычислимых нумераций87

Сахарова Л.В.

Численный анализ интегро-дифференциальной задачи изоэлектрического фокусирования в «гипергауссовских» режимах89

Украинец В.Н., Бейсембаев М.К., Гирнис С.Р., Тлеулесов А.К.

Влияние скорости и периода синусоидальной нагрузки, движущейся в подземном трубопроводе, на окружающий породный массив97

Татосов А.В. Растекание жидкости во влажной пористой среде104	Захарова И.Г., Пушкарев А.Н. Математическое обеспечение динамической интегрированной экспертной системы поддержки принятия решений в маркетинге151	
Аксенов Б.Г., Карякина С.В. Моделирование колебаний границы промерзания-оттаивания в слое теплоизоляции надземных тепловых сетей110	Оленников А.А., Оленников Е.А., Захаров А.А. Программный комплекс для моделирования аппарата кипящего слоя и процессов, протекающих в нем156	
Пирогов С.П., Чуба А.Ю. Сравнение результатов расчетов динамических моделей манометрических трубчатых пружин114	Постарнак Д.В. Критический анализ моделей нейронных сетей162	
Пирогов С.П., Устинов Н.Н. Математическая модель напряженно-деформируемого состояния манометрической трубчатой пружины с переменной по периметру сечения толщиной стенки119	Карасева Е.И. Экспертная информация для оценки операционных рисков168	
ИНФОРМАТИКА		
Борзых В.Э., Семенов Б.В. Имитационное моделирование процессов течения многокомпонентных газов через пористую структуру с использованием технологии NVIDIA CUDA125	Баутин С.П., Обухов А.Г. Математическое моделирование и численный расчет течений в придонной части тропического циклона175	
Абушева А.А., Глухих И.Н. Оптимизационная модель планирования деятельности проектных организаций129	Обухов А.Г. Математическое моделирование и численные расчеты течений в придонной части торнадо183	
Глухих И.Н. Событийное представление моделируемых объектов. Правила преобразований133	ОБЗОРЫ И РЕЦЕНЗИИ	
Ивашко А.Г., Иванова Е.И., Овсянникова Е.О., Коломиец С.И. Применение дескрипционной логики для описания архитектуры информационной системы137	Физика и геополитика (библиографический обзор)189	
Ивашко А.Г., Григорьев А.В., Григорьев М.В. Модификация табличного алгоритма на основе проверки непересекаемости сложных концептов143	Авторы публикаций192	

CONTENTS

PHYSICS

Aleksander I. Filippov, Oksana V. Ahmetova, Artem S. Rodionov	Asymptotic averaging of turbulent flow in a well6
Vitalii P. Kosyakov, Sergey P. Rodionov	Determine the best placement of wells in the gallery zone-inhomogeneous layer14
Lyubov N. Sokoluk, Sergey P. Rodionov	The method of calculating the best option combining layers of a geological model based on the minimization of upscaling's error22
Pavel T. Zubkov, Anna V. Yakovenko	Thermal and dynamic effects of the gas on the boundaries of vibrating cavity29
Eduard A. Arinshtein, Yuriy D. Kirillov	Damp ground freezing (2). Successive approximation technique34
Boris G. Aksenov, Svetlana V. Karyakina	Modeling of nonstationary heat exchange in multilayer skeleton panels constructions38
Aleksander A. Vakulin, Boris G. Aksenov, Aleksey V. Tatosov, Aleksander A. Vakulin	Measuring flowrate of dispersion structure multiphase flow42
Anna A. Schmidberskaya, Sergey Y. Udovichenko	Unsteady temperature fields investigation under the impact of highly-focused heavy ions beam with flat two-layered target47
Boris V. Grigorjev, Alexander B. Shabarov	Experimental study of freezing and thawing of soil in disequilibrium conditions53

**Vladimir N. Kutrunov,
Pavel Y. Mikhailov,
Lyudmila A. Puldas,
Aleksander A. Vakulin,
Maxim N. Vilkov**

Experimental research and physical-
mathematical modeling process of cooling
oil in the underground pipeline61

**Alexander G. Ivashko,
Alexander A. Zaharov,
Ivan Y Karyakin**

Forecasting hardenability of the steel
on the basis of the thermal conductivity
equation68

**Alexander B. Shabarov,
Aleksander A. Vakulin,
Alexander A. Zaharov,
Lyudmila P. Semikhina,
Nikolay V. Sarantchin,
Aleksander A. Vakulin,
Sergey N. Sarantchin**

The measurement-calculation system
of diagnostics of fluxion and heat exchange
parameters of the multiphase mixture
in well and pipelines74

Elena I. Kuznetsova

Fluid filtration through two zones fractured
porous formation80

MATHEMATICS

Alexander N. Degtev

Liquid spreading in the damp
to the porous environment87

Lyudmila V. Sakharova

The investigation of "hyper-gaussian"
regimen by integro-differential problem
of isoelectric focusing by means
of numerical methods89

**Vitaliy N. Ukrainets,
Murat K. Beisembayev,
Svetlana R. Girnis,
Askar K. Tleulessov**

Influence of rate and the period
of sinusoidal loading, moving
in the underground pipeline,
on surrounding massif97

Aleksey V. Tatosov
Liquid spreading in the damp
to the porous environment104

**Boris G. Aksenov,
Svetlana V. Karyakina**
Modeling of freezing-melting boundary
oscillation in an overground heat pipeline
thermal insulator layer110

**Sergey P. Pirogov,
Aleksander Y. Chuba**
Comparison of result of calculation
of dynamics models of manometric tubular
springs114

Sergey P. Pirogov, Nikolay N. Ustinov
Mathematical model of stress-strain state
of the tubular spring
with the non-constant119

INFORMATICS

Vladimir E. Borzyh, Boris V. Semenov
Simulation modelling of processes
of multi-component gas flow through
porous structure, with the use
of NVIDIA CUDA technology125

Alina A. Abusheva, Igor N. Glukhikh
The optimization model of planning activity
for designing organizations129

Igor N. Glukhikh
The event representation of modeled
objects. The rules of transformation133

**Alexander G. Ivashko,
Ekaterina I. Ivanova,
Ekaterina O. Ovsyannikova,
Sergey I. Kolomiets**
Applying description logic for describing
information system architecture137

**Alexander G. Ivashko,
Andrey V. Grigorjev,
Mikhail V. Grigorjev**
Modification of tableau algorithm based
on checking disjointness
of complex concepts143

**Irina G. Zaharova,
Aleksander N. Pushkarev**
Software the dynamic integrated expert
system of support of decision-making
in marketing151

**Alexey A. Olennikov,
Evgeniy A. Olennikov,
Alexander A. Zaharov**
Software system for modeling
and apparatus fluidized bed process
takes place in it156

Dmitry V. Postarnak
The critical analysis of models
of neural networks162

Ekaterina I. Karaseva
Expert information
for operational risk estimation168

**Sergey P. Bautin,
Alexander G. Obukhov**
The mathematical modeling and numerical
calculation of the flows in a lower part
of a tropical cyclone175

Alexander G. Obukhov
The mathematical modeling and numerical
calculations of the flows in a lower part
of a tornado183

REVIEWS

Physics and geopolitics.
(Bibliographic review)189

Authors of the publications196

Каталог Почта России — индекс 80149
<http://www.vipishi.ru> — индекс 80149

✉ АДРЕС РЕДАКЦИИ:
625003, г. Тюмень, ул. Семакова, 10, к. 219
☎ (3452) 46-42-10
e-mail: vestnik@utmn.ru
www.utmn.ru/sec/597;
<http://www.elibrary.ru>

© В.Н. УКРАИНЕЦ, М.К. БЕЙСЕМБАЕВ,
С.Р. ГИРНИС, А.К. ТЛЕУЛЕСОВ

vitnikukr@mail.ru

УДК 539.3

**ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ
И ПЕРИОДА СИНУСОИДАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ,
ДВИЖУЩЕЙСЯ В ПОДЗЕМНОМ ТРУБОПРОВОДЕ,
НА ОКРУЖАЮЩИЙ ПОРОДНЫЙ МАССИВ**

АННОТАЦИЯ. На основе решения задачи о действии подвижной периодической нагрузки на тонкостенную круговую цилиндрическую оболочку в упругом полупространстве, проведен численный анализ влияния скорости и периода движущейся в подземном трубопроводе синусоидальной нагрузки на напряженно-деформированное состояние окружающего его породного массива.

SUMMARY. On the basis of solved problem about an action of mobile periodic load on thin-walled circular cylindrical cover in elastic half-space, the numerical analysis of influence of velocity and the period moving in the underground pipeline of sinusoidal load on the tense-deformed condition of surrounding massif it is made.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Подземный трубопровод, подвижная нагрузка, напряженно-деформированное состояние.

KEY WORDS. Underground pipeline, mobile load, tense-deformed condition.

Обеспечение безопасности эксплуатации подземных трубопроводов, в частности нефтепроводов, является одной из наиболее актуальных задач трубопроводного транспорта. Конструкции данных сооружений имеют, как правило, большую протяженность и находятся при эксплуатации в условиях многофакторного нагружения и агрессивного воздействия окружающей среды. Одним из таких нагружений является подвижная нагрузка в нефтепроводе — периодическая, бегущая с постоянной скоростью волна давления, возникающая в результате действия импульсивных периодических возмущений от работающих компрессоров и вызывающая его колебания. В качестве основных модельных задач, используемых для исследования динамики подземных нефтепроводов в этом случае, обычно рассматриваются задачи об осесимметричной нормальной нагрузке давления, равномерно движущейся по внутренней поверхности круговой цилиндрической оболочки, расположенной в упругом пространстве (в случае глубокого заложения трубопровода) или полупространстве (в случае мелкого заложения трубопровода). Особый интерес вызывает последняя задача, так как в этом случае обязательно следует учитывать влияние земной поверхности на концентрацию напряжений в окрестности оболочки при дифракции отраженных волн [1].

Постановка и аналитическое решение задачи. Используя для исследований модельный подход, представим подземный трубопровод как бесконечно длинную круговую цилиндрическую тонкостенную оболочку, ось которой совпадает с осью z декартовой (x, y, z) или цилиндрической (r, θ, z) неподвижной системой координат. Оболочка расположена в линейно-упругом, однородном и изотропном полупространстве $x \leq h$, параллельно его горизонтальной границе $x = h$ (земной поверхности), свободной от нагрузок. Обозначим радиус срединной поверхности оболочки R ($R < h$), а ее толщину — h_0 . В силу малости толщины оболочки полагаем, что массив контактирует с оболочкой вдоль ее срединной поверхности. Контакт между оболочкой и массивом полагаем жестким. Физико-механические свойства оболочки и массива характеризуются соответственно следующими постоянными: ν_0, ν — коэффициенты Пуассона; μ_0, μ — модули сдвига; ρ_0, ρ — плотности. Пусть на внутреннюю поверхность оболочки действует движущаяся с постоянной скоростью c в направлении оси z нагрузка P , периодическая по z . При этом будем считать, что скорость движения нагрузки меньше скоростей распространения волн сдвига в массиве (дозвуковой случай).

Определим реакцию полупространства на данную подвижную нагрузку, используя для описания его движения динамические уравнения теории упругости в подвижной системе координат $\eta = z - ct$ [1]:

$$\left(\frac{1}{M_p^2} - \frac{1}{M_s^2} \right) \text{grad div } \mathbf{u} + \frac{1}{M_s^2} \nabla^2 \mathbf{u} = \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial \eta^2}, \quad (1)$$

где \mathbf{u} — вектор смещения упругой среды; $M_p = c/c_p$, $M_s = c/c_s$ — числа Маха; c_p, c_s — скорости распространения волн расширения-сжатия и сдвига в среде, ∇^2 — оператор Лапласа.

Для описания движения оболочки воспользуемся классическими уравнениями теории тонких оболочек [2], которые в подвижной системе координат имеют вид

$$\begin{aligned} \left[1 - \frac{(1-\nu_0)\rho_0 c^2}{2\mu_0} \right] \frac{\partial^2 u_{0\eta}}{\partial \eta^2} + \frac{1-\nu_0}{2R^2} \frac{\partial^2 u_{0\eta}}{\partial \theta^2} + \frac{1+\nu_0}{2R} \frac{\partial^2 u_{0\theta}}{\partial \eta \partial \theta} + \frac{\nu_0}{R} \frac{\partial u_{0r}}{\partial \eta} &= \frac{1-\nu_0}{2\mu_0 h_0} (P_\eta - q_\eta), \\ \frac{1+\nu_0}{2R} \frac{\partial^2 u_{0\eta}}{\partial \eta \partial \theta} + \frac{(1-\nu_0)}{2} \left(1 - \frac{\rho_0 c^2}{\mu_0} \right) \frac{\partial^2 u_{0\theta}}{\partial \eta^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 u_{0\theta}}{\partial \theta^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial u_{0r}}{\partial \theta} &= \frac{1-\nu_0}{2\mu_0 h_0} (P_\theta - q_\theta), \quad (2) \\ \frac{\nu_0}{R} \frac{\partial u_{0\eta}}{\partial \eta} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial u_{0\theta}}{\partial \theta} + \frac{h_0^2}{12} \nabla^2 \nabla^2 u_{0r} + \frac{(1-\nu_0)\rho_0 c^2}{2\mu_0} \frac{\partial^2 u_{0r}}{\partial \eta^2} + \frac{u_{0r}}{R^2} &= -\frac{1-\nu_0}{2\mu_0 h_0} (P_r - q_r), \end{aligned}$$

где $u_{0\eta}, u_{0\theta}, u_{0r}$ — перемещения точек срединной поверхности оболочки; q_η, q_θ, q_r — составляющие реакции окружающей оболочку среды (при $r = R$ $q_\eta = \sigma_{r\eta}$, $q_\theta = \sigma_{r\theta}$, $q_r = \sigma_{rr}$, где σ_{rj} — компоненты тензора напряжений в среде, $j = \eta, \theta, r$); $P_\eta(\theta, \eta), P_\theta(\theta, \eta), P_r(\theta, \eta)$ — составляющие интенсивности подвижной нагрузки $P(\theta, \eta)$.

Так как граница полупространства свободна от нагрузок, то при $x = h$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{xy} = \sigma_{x\eta} = 0. \quad (3)$$

При жестком сцепления оболочки с массивом

$$u_j \Big|_{r=R} = u_{0j}, \quad j = \eta, \theta, r. \quad (4)$$

Здесь u_r, u_θ, u_η — компоненты вектора \mathbf{u} .

Задача сводится к совместному интегрированию уравнений движения массива (1) и оболочки (2) при выполнении граничных условий (3), (4).

Выразив \mathbf{u} через потенциалы Ламе [1]

преобразуем (1) к виду $\mathbf{u} = \text{grad}\varphi_1 + \text{rot}(\varphi_2 \mathbf{e}_\eta) + \text{rotrot}(\varphi_3 \mathbf{e}_\eta)$,

$$\nabla^2 \varphi_j = M_j^2 \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial \eta^2}, \quad j = 1, 2, 3, \quad (5)$$

где $M_1 = M_\rho, M_2 = M_3 = M_s$.

Рассмотрим случай синусоидальной подвижной нагрузки с произвольной зависимостью от угловой координаты

$$P_j(\theta, \eta) = p_j(\theta) e^{i\zeta \eta}, \quad p_j(\theta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} P_{nj} e^{in\theta}, \quad j = r, \theta, \eta, \quad (6)$$

где константа ζ определяет период $T = 2\pi/\zeta$ действующей нагрузки.

Потенциалы φ_j также будем искать в виде периодических функций по η

$$\varphi_j(r, \theta, \eta) = \Phi_j(r, \theta) e^{i\zeta \eta}. \quad (7)$$

Из (5) и (7) следует, что

$$\Delta_2 \Phi_j - m_j^2 \zeta^2 \Phi_j = 0, \quad j = 1, 2, 3. \quad (8)$$

Здесь $m_j^2 = 1 - M_j^2$, $m_1 \equiv m_\rho$, $m_2 = m_3 \equiv m_s$, Δ_2 — двумерный оператор Лапласа.

Выразив компоненты напряженно-деформированного состояния (НДС) массива через потенциалы Ламе, можно получить выражения для перемещений u_l и напряжений σ_{lm} от синусоидальной подвижной нагрузки в декартовой ($l = x, y, \eta$, $m = x, y, \eta$) и цилиндрической ($l = r, \theta, \eta$, $m = r, \theta, \eta$) системах координат как функции от Φ_j .

Так как скорость нагрузки меньше скорости распространения волн сдвига в массиве, то $M_s < 1$ ($m_s > 0$) и решения (8) можно представить в виде [1]

$$\Phi_j = \Phi_j^{(1)} + \Phi_j^{(2)}, \quad (9)$$

$$\Phi_j^{(1)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{nj} K_n(k_j r) e^{in\theta}, \quad \Phi_j^{(2)} = \int_{-\infty}^{\infty} g_j(\zeta, \tilde{\zeta}) \exp(iy\zeta + (x-h)\sqrt{\zeta^2 + k_j^2}) d\zeta,$$

где $K_n(k_j r)$ — функции Макдональда, $k_j = m_j \zeta$; $g_j(\zeta, \tilde{\zeta})$, a_{nj} — неизвестные функции и коэффициенты, подлежащие определению, $j = 1, 2, 3$.

Используя с учетом (3) метод разложения потенциалов на плоские волны и переразложения плоских волн в ряды по цилиндрическим функциям [1], можно выразить функции $g_j(\zeta, \tilde{\zeta})$ через коэффициенты a_{nj} и получить аналитические выражения для компонент НДС массива при скоростях движения нагрузки меньших, чем скорость волны Рэлея c_R в полупространстве, где неиз-

вестными будут только коэффициенты a_{nj} , $j = 1, 2, 3$. Для определения последних следует воспользоваться граничными условиями (4).

Для перемещения точек срединной поверхности оболочки при действии синусоидальной подвижной нагрузки, имеем

$$u_{0j}(\theta, \eta) = U_{0j}(\theta) e^{i\xi\eta}, \quad U_{0j}(\theta) = \sum_{n=0}^{\infty} u_{0nj} e^{in\theta}, \quad j = r, \theta, \eta. \quad (10)$$

Подставляя (6) и (10) в уравнения (2), для n -го члена разложения получим

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^2 u_{0m\eta} + \nu_{02} n \xi_0 u_{0n\theta} - 2i\nu_0 \xi_0 u_{0nr} &= G_0 (P_{m\eta} - q_{m\eta}), \\ \nu_{02} n \xi_0 u_{0n\eta} + \varepsilon_2^2 u_{0n\theta} - 2inu_{0nr} &= G_0 (P_{n\theta} - q_{n\theta}), \\ 2i\nu_0 \xi_0 u_{0m\eta} + 2inu_{0n\theta} + \varepsilon_3^2 u_{0nr} &= G_0 (P_{nr} - q_{nr}), \end{aligned} \quad (11)$$

где $\varepsilon_1^2 = \alpha_0^2 - \varepsilon_0^2$, $\varepsilon_2^2 = \beta_0^2 - \varepsilon_0^2$, $\varepsilon_3^2 = \gamma_0^2 - \varepsilon_0^2$, $\varepsilon_0^2 = \nu_{01} \xi_0^2 M_{s0}^2$, $\xi_0 = \xi R$,

$$\alpha_0^2 = 2\xi_0^2 + \nu_{01} n^2, \quad \xi_0 = \xi R, \quad \beta_0^2 = \nu_{01} \xi_0^2 + 2n^2, \quad \gamma_0^2 = \chi^2 (\xi_0^2 + n^2) + 2,$$

$$\nu_{01} = 1 - \nu_0, \quad \nu_{02} = 1 + \nu_0, \quad M_{s0} = \frac{c}{c_{s0}}, \quad c_{s0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\rho_0}}, \quad \chi^2 = \frac{h_0^2}{6R^2}, \quad G_0 = -\frac{\nu_{01} R^2}{\mu_0 h_0};$$

а $q_{n\eta} = (\sigma_{r\eta})_n$, $q_{n\theta} = (\sigma_{r\theta})_n$, $q_{nr} = (\sigma_{rr})_n$ при $r = R$.

Разрешая (11) относительно $u_{0n\eta}$, $u_{0n\theta}$, u_{0nr} , находим

$$\begin{aligned} u_{0m\eta} &= G_0 \sum_{j=1}^3 \frac{\delta_{mj}}{\delta_n} (P_{nj} - q_{nj}), \\ u_{0n\theta} &= G_0 \sum_{j=1}^3 \frac{\delta_{\theta j}}{\delta_n} (P_{nj} - q_{nj}), \\ u_{0nr} &= G_0 \sum_{j=1}^3 \frac{\delta_{rj}}{\delta_n} (P_{nj} - q_{nj}). \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь $\delta_n = (\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3)^2 - (\varepsilon_1 \xi_1)^2 - (\varepsilon_2 \xi_2)^2 + 2\xi_1 \xi_2 \xi_3$,

$$\delta_{\eta 1} = (\varepsilon_2 \varepsilon_3)^2 - \xi_1^2, \quad \delta_{\eta 2} = \xi_1 \xi_2 - \xi_3 \varepsilon_3^2, \quad \delta_{\eta 3} = i(\varepsilon_2 \xi_2 - \xi_1 \xi_3),$$

$$\delta_{\theta 1} = \delta_{\eta 2}, \quad \delta_{\theta 2} = (\varepsilon_1 \varepsilon_3)^2 - \xi_2^2, \quad \delta_{\theta 3} = i(\varepsilon_1 \xi_1 - \xi_2 \xi_3),$$

$$\delta_{r1} = -\delta_{\eta3}, \delta_{r2} = -\delta_{03}, \delta_{r3} = (\varepsilon_1 \varepsilon_2)^2 - \xi_3^2, \xi_1 = 2n, \xi_2 = 2\nu_0 \xi_0, \xi_3 = \nu_{02} \xi_0 n;$$

для P_{nj} и q_{nj} индекс $j = 1$ соответствует индексу η , $j = 2-\theta$, $j = 3-r$.

Подставляя (12) в (4) и приравнивая коэффициенты рядов Фурье-Бесселя при $e^{in\theta}$, получим бесконечную систему линейных алгебраических уравнений для определения коэффициентов a_{nj} . Для решения этой системы можно использовать метод редукции, но наиболее удобным для решения поставленной задачи является метод последовательных отражений [3], который позволяет на каждом последовательном отражении решать системы линейных уравнений блочно-диагонального вида. Как показали исследования определителя данной системы, его обращение в ноль возможно только при скоростях нагрузки не меньшей, чем скорость рэлеевской волны c_R .

В случае произвольной периодической по η нагрузки, разлагая ее в ряд Фурье, для каждой составляющей ряда получим вышерассмотренную задачу.

Численный анализ НДС породного массива в окрестности подземного трубопровода. Исследуем влияние на напряженно-деформированное состояние окружающего трубопровод массива скорости движения c и периода $T = 2\pi/\zeta$ нормальной осесимметричной синусоидальной нагрузки $P_r \equiv P$ с амплитудой P_A , оказывающей наибольшее давление на внутреннюю поверхность трубопровода в начале подвижной системы координат ($\eta = 0$). В качестве примера рассмотрим подземный стальной трубопровод в массиве алевролита ($\nu = 0,28$, $\mu = 4,69 \cdot 10^3$ МПа, $\rho = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м³, $c_s = 1318$ м/с; $c_R = 1218$ м/с [4]) с характеристиками: $\nu_0 = 0,3$, $\mu_0 = 8,08 \cdot 10^{10}$ Па, $\rho_0 = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³; $R = 0,703$ м, $h_0 = 0,014$ м [5]. Принимаем небольшую глубину заложения трубопровода $h = 2R$. Контакт трубопровода с массивом полагаем жестким.

В таблицу 1 помещены результаты расчетов максимальных прогибов земной поверхности $u_x = u_x \mu / P_A$ ($\eta = y = 0, x = h$) при различных скоростях c и периодах T нагрузки.

Таблица 1

Максимальные прогибы u_x° земной поверхности

с, м/с	Т, м				
	2π	π	$\pi/2$	$\pi/4$	$\pi/8$
	$u_x^\circ, \text{ м}$				
100	0,293	0,150	0,035	0,002	0,000
400	0,311	0,167	0,040	0,003	0,000
600	0,337	0,194	0,050	0,004	0,000

Из анализа результатов расчетов следует, что возрастание скорости движения нагрузки ведет к увеличению прогибов земной поверхности. С уменьшением T прогибы уменьшаются и при $T = \pi/4$ м, то есть при $T/h = 0,6$, они, как и другие компоненты НДС земной поверхности, практически равны нулю для всех рассматриваемых скоростей нагрузки. В этом случае толщина окружающего трубопровод динамически активного слоя массива приблизительно равна половине его глубины заложения — $h/2 = R$. При дальнейшем уменьшении T , толщина динамически активного слоя становится меньше. Таким образом,

в случае $T/h < 0,6$ для расчета трубопровода на данную нагрузку можно использовать более простую расчетную схему — оболочку в безграничном упругом пространстве.

В таблице 2 для нагрузки с периодом $T = \pi/8$ м приведены результаты расчетов напряженно-деформированного состояния массива на контуре поперечного сечения трубопровода в подвижной координатной плоскости xu , произведенные по двум расчетным схемам (РС): 1 — оболочка в упругом полупространстве, 2 — оболочка в упругом пространстве. Скорость движения нагрузки $c = 800$ м/с. В таблицах приняты следующие обозначения: $u_r^\circ = u_r \mu / P_A$, м, $\sigma_{rr}^\circ = \sigma_{rr} / P_A$, $\sigma_{\theta\theta}^\circ = \sigma_{\theta\theta} / P_A$, $\sigma_{\eta\eta}^\circ = \sigma_{\eta\eta} / P_A$.

Таблица 2

**Компоненты НДС массива на контуре поперечного сечения трубопровода
($T = \pi/8$ м, $c = 800$ м/с)**

РС	Комп. НДС	θ , град.						
		0	30	60	90	120	150	180
1	u_r°	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057
	σ_{rr}°	-1,115	-1,115	-1,115	-1,115	-1,115	-1,115	-1,115
	$\sigma_{\theta\theta}^\circ$	-0,259	-0,259	-0,259	-0,259	-0,259	-0,259	-0,259
	$\sigma_{\eta\eta}^\circ$	-0,550	-0,550	-0,550	-0,550	-0,550	-0,550	-0,550
2	u_r°	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057
	σ_{rr}°	-1,115	-1,115	-1,115	-1,115	-1,115	-1,115	-1,115
	$\sigma_{\theta\theta}^\circ$	-0,259	-0,259	-0,259	-0,259	-0,259	-0,259	-0,259
	$\sigma_{\eta\eta}^\circ$	-0,550	-0,550	-0,550	-0,550	-0,550	-0,550	-0,550

Как видно из таблицы, даже при относительно близкой скорости движения нагрузки с данным периодом к скорости рэлеевской волны, отличия в значениях компонент напряженно-деформированного состояния исследуемого контура, полученных при использовании различных расчетных схем подземного трубопровода, отсутствуют.

Результаты аналогичных расчетов при периоде $T = 2\pi$ м и скорости нагрузки $c = 100$ м/с, помещены в таблицу 3.

Таблица 3

**Компоненты НДС массива на контуре поперечного сечения трубопровода
($T = 2\pi$ м, $c = 100$ м/с)**

РС	Комп. НДС	θ , град.						
		0	30	60	90	120	150	180
1	u_r°	0,396	0,345	0,253	0,196	0,184	0,193	0,199
	σ_{rr}°	-0,698	-0,680	-0,653	-0,661	-0,693	-0,719	-0,725
	$\sigma_{\theta\theta}^\circ$	0,578	0,650	0,728	0,703	0,613	0,520	0,479
	$\sigma_{\eta\eta}^\circ$	-0,315	-0,289	-0,253	-0,245	-0,259	-0,275	-0,282
2	u_r°	0,213	0,213	0,213	0,213	0,213	0,213	0,213
	σ_{rr}°	-0,726	-0,726	-0,726	-0,726	-0,726	-0,726	-0,726
	$\sigma_{\theta\theta}^\circ$	0,499	0,499	0,499	0,499	0,499	0,499	0,499
	$\sigma_{\eta\eta}^\circ$	-0,259	-0,259	-0,259	-0,259	-0,259	-0,259	-0,259

Из анализа результатов следует, что даже при относительно низких скоростях движения нагрузки, отличия в значениях сравниваемых выше компонент напряженно-деформированного состояния породного массива довольно существенны. С увеличением скорости движения нагрузки эта тенденция усиливается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ержанов Ж.С., Айтиалиев Ш.М., Алексеева Л.А. Динамика тоннелей и подземных трубопроводов. Алма-Ата: Наука, 1989. 240 с.
2. Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластин и оболочек. М.: Наука, 1972. 432 с.
3. Украинец В.Н. Динамика тоннелей и трубопроводов мелкого заложения под воздействием подвижных нагрузок. Павлодар: НИЦ ПГУ им. С. Торайгырова, 2006. 123 с.
4. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах. М.: Недра, 1989. 270 с.
5. Бородавкин П.П. Подземные магистральные трубопроводы. М.: Недра, 1982. 384 с.

АВТОРЫ ПУБЛИКАЦИЙ

Абушева Алина Абушевна — аспирант кафедры информационных систем Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета

Аксенов Борис Гаврилович — зав. кафедрой математики Тюменского государственного архитектурно-строительного университета, доктор физико-математических наук, профессор

Аринштейн Эдуард Абрамович — профессор кафедры моделирования физических процессов и систем Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета, доктор физико-математических наук

Ахметова Оксана Валентиновна — доцент кафедры теоретической физики и методики обучения физике Стерлитамакской государственной педагогической академии, кандидат физико-математических наук

Баутин Сергей Петрович — профессор кафедры высшей математики Уральского государственного университета путей сообщения, доктор физико-математических наук

Бейсембаев Мурат Кулханович — доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды Павлодарского государственного университета, кандидат технических наук

Борзых Владимир Эрнестович — зав. кафедрой автоматизации и вычислительной техники Тюменского государственного нефтегазового университета, доктор физико-математических наук, профессор

Вакулин Александр Анатольевич — зам. директора Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета, доктор технических наук, профессор

Вакулин Александр Александрович — аспирант кафедры механики многофазных систем Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета

Вилков Максим Николаевич — аспирант кафедры механики многофазных систем Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета

Гирнис Светлана Римонтасовна — доцент кафедры вычислительной техники и программирования Павлодарского государственного университета, кандидат технических наук

Глухих Игорь Николаевич — зам. директора по учебной работе Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета, доктор технических наук, профессор

Григорьев Андрей Викторович — аспирант кафедры информационных систем Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета

Григорьев Борис Владимирович — аспирант кафедры механики многофазных систем Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета

Григорьев Михаил Викторович — доцент кафедры информационных систем Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета, кандидат технических наук

Дегтев Александр Николаевич — профессор кафедры алгебры и математической логики Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета, доктор физико-математических наук

Захаров Александр Анатольевич — зав. кафедрой информационной безопасности Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета, доктор технических наук, профессор

Захарова Ирина Гелиевна — зав. кафедрой программного обеспечения Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета, доктор педагогических наук, профессор

Зубков Павел Тихонович — зав. лабораторией вычислительной гидродинамики Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор

Иванова Екатерина Игоревна — аспирант кафедры информационных систем Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета

Ивашко Александр Григорьевич — зав. кафедрой информационных систем Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета, доктор технических наук, профессор

Карасева Екатерина Ивановна — аспирант кафедры бизнес-информатики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения

Карякин Иван Юрьевич — ассистент кафедры информационных систем Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета

Карякина Светлана Валентиновна — доцент кафедры математики Тюменского государственного архитектурно-строительного университета, кандидат технических наук

Кириллов Юрий Дмитриевич — аспирант кафедры моделирования физических процессов и систем Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета

Коломиец Сергей Иванович — аспирант кафедры информационных систем Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета

Косяков Виталий Петрович — аспирант кафедры механики многофазных систем Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета

Кузнецова Елена Игоревна — старший преподаватель кафедры высшей математики Технологического института Национального исследовательского ядерного университета МИФИ (г. Лесной)

Кутрунов Владимир Николаевич — зав. кафедрой алгебры и математической логики Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор

Михайлов Павел Юрьевич — старший преподаватель кафедры механики многофазных систем Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета

Обухов Александр Геннадьевич — профессор кафедры высшей математики Тюменского государственного нефтегазового университета, доктор физико-математических наук

Овсянникова Екатерина Олеговна — аспирант кафедры информационных систем Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета

Оленников Алексей Александрович — доцент кафедры теплогаснабжения и вентиляции Сибирского государственного индустриального университета, кандидат технических наук

Оленников Евгений Александрович — доцент кафедры информационной безопасности Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета, кандидат технических наук

Пирогов Сергей Петрович — профессор кафедры прикладной механики Тюменского государственного нефтегазового университета, доктор технических наук

Постарнак Дмитрий Владимирович — аспирант Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета

Пульдас Людмила Александровна — старший преподаватель кафедры теплогаснабжения и вентиляции Тюменского государственного архитектурно-строительного университета, кандидат технических наук

Пушкарев Александр Николаевич — аспирант кафедры программного обеспечения Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета

Родионов Артем Сергеевич — аспирант кафедры теоретической физики и методики обучения физике Стерлитамакской государственной педагогической академии

Родионов Сергей Павлович — зав. лабораторией нефтегазовой механики Тюменского филиала Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, заместитель генерального директора ЗАО «КОНКОРД» (г. Москва), профессор Тюменского государственного университета, доктор физико-математических наук

Саранчин Николай Викторович — доцент кафедры механики многофазных систем Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета, кандидат физико-математических наук

Саранчин Сергей Николаевич — аспирант кафедры механики многофазных систем Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета

Сахарова Людмила Викторовна — доцент кафедры общенаучных дисциплин филиала Морской государственной академии им. адмирала Ф.Ф. Ушакова (г. Ростов-на Дону), кандидат технических наук

Семенов Борис Васильевич — старший преподаватель кафедры автоматизации и вычислительной техники Тюменского государственного нефтегазового университета

Семихина Людмила Петровна — профессор кафедры механики многофазных систем Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета, доктор физико-математических наук

Соколюк Любовь Николаевна — старший научный сотрудник Тюменского филиала Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН

Татосов Алексей Викторович — профессор кафедры математического моделирования Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета

Тлеулесов Аскар Каримжанович — старший преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды Павлодарского государственного университета

Удовиченко Сергей Юрьевич — зам. директора НИИ прикладных наук Тюменского государственного университета, доктор физико-математических наук

Украинец Виталий Николаевич — профессор кафедры безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды Павлодарского государственного университета, доктор технических наук

Устинов Николай Николаевич — доцент кафедры общетехнических дисциплин Тюменской государственной сельскохозяйственной академии, кандидат технических наук

Филиппов Александр Иванович — профессор кафедры теоретической физики и методики обучения физике Стерлитамакской государственной педагогической академии, доктор технических наук

Чуба Александр Юрьевич — доцент кафедры общетехнических дисциплин Тюменской государственной сельскохозяйственной академии, кандидат технических наук

Шабаров Александр Борисович — зав. кафедрой механики многофазных систем Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета, доктор технических наук, профессор

Шмидберская Анна Алексеевна — старший преподаватель кафедры микро- и нанотехнологий Института математики, естественных наук и информационных технологий Тюменского государственного университета

Яковенко Анна Владимировна — инженер-исследователь Тюменского филиала Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН

AUTHORS OF THE PUBLICATIONS

Alina A. Abusheva — postgraduate student, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Boris G. Aksenov — Dr. Physic. and Math. Sci., Professor, Head of the Department of Mathematics, Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering

Eduard A. Arinshteyn — Dr. Physic. and Math. Sci., Professor, Department of Physical Systems and Processes Simulation, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Oksana V. Akhmetova — Cand. Physic. and Math., Associate Professor, Department of Theoretical Physics and Physics Teaching Methods, Sterlitamak state pedagogical academy

Sergey P. Bautin — Dr. Physic. and Math. Sci., Professor, Department of High Mathematicians, Ural State University of Railway Transport

Murat K. Beysembayev — Cand. Techn. Sci., Associate Professor, Department of Health and Safety and Protection of Environment, Pavlodar State University

Vladimir E. Borzykh — Dr. Physic. and Math. Sci., Professor, Head of the Department of Automation and Computer Science, Tyumen State Oil and Gas University

Aleksander A. Vakulin — Dr. Techn. Sci., Professor, Deputy director, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Aleksander A. Vakulin — postgraduate student, Department of Mechanics of Multiphase Systems, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Maksim N. Vilkov — postgraduate student, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Svetlana R. Girnis — Cand. Techn. Sci., Associate Professor, Department of Computer Facilities and Programming, Pavlodar State University

Igor N. Glukhikh — Dr. Techn. Sci., Professor, Deputy director on study, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Andrey V. Grigoryev — postgraduate student, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Boris V. Grigoryev — postgraduate student, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Mikhail V. Grigoryev — Cand. Techn. Sci., Associate Professor, Department of Information Systems, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Alexander N. Degtev — Dr. Physic. and Math. Sci., Professor, Department of Algebra and Mathematical Logic, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Alexander A. Zakharov — Dr. Techn. Sci., Professor, Head of the Department of Information Security, Institute of Mathematics, Humanities and Informational Technologies, Tyumen State University

Irina G. Zakharova — Dr. Pedag. Sci., Professor, Head of the Department of Software Support, Institute of Mathematics, Humanities and Informational Technologies, Tyumen State University

Pavel T. Zubkov — Dr. Physic. and Math. Sci., Professor, Head of laboratory of Computational Fluid Dynamics, Institute of Mathematics, Humanities and Informational Technologies, Tyumen State University

Ekaterina I. Ivanova — postgraduate student, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Alexander G. Ivashko — Dr. Techn. Sci., Professor, Head of the Department of Information Systems, Institute of Mathematics, Humanities and Informational Technologies, Tyumen State University

Ekaterina I. Karaseva — postgraduate student, Department of Business Informatics, St. Petersburg State University of Space Instrumentation

Ivan Y. Karyakin — Associate Professor, Department of Information Systems, Institute of Mathematics, Humanities and Informational Technologies, Tyumen State University

Svetlana V. Karyakina — Cand. Techn. Sci., Senior Lecturer, Department of Mathematics, Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering

Yuriy D. Kirillov — postgraduate student, Department of Physical Systems and Processes Simulation, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Sergey I. Kolomieyts — postgraduate student, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Vitaliy P. Kosyakov — postgraduate student, Department of Multiphase System, Institute of Mathematics, Humanities and Informational Technologies, Tyumen State University

Elena I. Kuznetsova — Senior Lecturer, Department of the Higher Mathematics, Institute of technology, National research nuclear university, MIPhI (Lesnoy)

Vladimir N. Kutrunov — Dr. Physic. and Math. Sci., Professor, Head of the Department of Algebra and Mathematical Logic, Institute of Mathematics, Humanities and Informational Technologies, Tyumen State University

Pavel Y. Mikhajlov — Senior Lecturer, Department of Multiphase System, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Alexander G. Obukhov — Dr. Physic. and Math. Sci., Professor, Department of High Mathematicians, Tyumen State Oil and Gaz University

Ekaterina O. Ovsyannikova — postgraduate student, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Aleksey A. Olennikov — Cand. Techn. Sci., Associate Professor, Department of Heatgas Supply and Ventilation, Siberian State Industrial University

Evgeniy A. Olennikov — Cand. Techn. Sci., Associate Professor, Department of Software Support, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Sergey P. Pirogov — Dr. Techn. Sci., Professor, Department of Applied Mechanics, Tyumen State Oil and Gaz University

Dmitriy V. Postarnak — postgraduate student, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Lyudmila A. Puldas — Cand. Tech. Sci., Senior Lecturer, Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Tyumen State Architectural and Building University

Aleksander N. Pushkarev — postgraduate student, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Artem S. Rodionov — postgraduate student, Department of Theoretical Physics and Physics Teaching Methods, Sterlitamak State Pedagogical academy

Sergey P. Rodionov — Dr. Physic. and Math. Sci., Professor, Head of the Department of Oil and Gas Mechanics, Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Tyumen branch, Siberian branch, Russian Academy of Sciences

Nikolay V. Sarantchin — Cand. Physic. and Math., Associate Professor, Department of Mechanics of Multiphase Systems, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Sergey N. Sarantchin — postgraduate student, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Lyudmila V. Sakharova — Cand. Techn. Sci., Associate Professor, Department of General Scientific Disciplines of Branch, Sea State Academy (Rostov)

Boris V. Semenov — Senior Lecturer, Department of Automation and Computer Facilities, Tyumen State Oil and Gaz University

Lyudmila P. Semikhina — Dr. Physic. and Math., Professor, Department of Mechanics of Multiphase Systems, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Lyubov N. Sokoliuk — Senior researcher, Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Tyumen branch, Siberian branch, Russian Academy of Sciences

Aleksey V. Tatosov — Dr. Physic. and Math., Professor, Department of Mathematical Modelling, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Askar K. Tleulesov — Senior Lecturer, Department of Health and Safety and Protection of Environment, Pavlodar State University

Sergey Y. Udovitchenko — Dr. Physic. and Math., Professor, Deputy director of scientific research, Institute of Applied Sciences, Tyumen State University

Vitaliy P. Ukrainets — Dr. Techn. Sci., Professor, Department of Health and Safety and Protection of Environment, Pavlodar State University

Nikolay N. Ustinov — Cand. Techn. Sci., Associate Professor, Department of All-technical Disciplines, Tyumen State Agricultural Academy

Aleksander I. Filippov — Dr. Techn. Sci., Professor, Department of Theoretical Physics and Physics Teaching Methods, Sterlitamak State Pedagogical Academy

Aleksander Y. Tchuba — Cand. Techn. Sci., Associate Professor, Department of All-technical Disciplines, Tyumen State Agricultural Academy

Alexander B. Shabarov — Dr. Techn. Sci., Professor, Head of the Department of Mechanics of Multiphase Systems, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Anna A. Shmidberskaya — Senior Lecturer, Department Micro- and Nanotechnologies, Institute of Mathematics, Humanities and Information Technologies, Tyumen State University

Anna V. Yakovenko — Research engineer, Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Tyumen branch, Siberian branch, Russian Academy of Sciences

Научное издание

ВЕСТНИК
ТЮМЕНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
№ 4. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ. ИНФОРМАТИКА. 2012.

Редактор: Л.Б. Сигунова
Художник: Н.П. Пискулин
Компьютерная верстка: Я.Л. Чернявская
Печать: Н.С. Власова, А.В. Башкиров, В.В. Торопов

Подписано в печать 19.04.2012
Формат 70x108/16
Бумага Xerox Perfect Print
Обложка Stromcard EC
Гарнитура Quant Antiqua
Печать электрографическая
17,50 усл. печ. л. 14,0 уч.-изд. л.
Тираж 500 экз. Заказ № 290

Издательство
Тюменского государственного
университета
625000, г. Тюмень,
ул. Семакова, 10
Тел. (3452) 46-27-32
izdatelstvo@utmn.ru