
**НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК
НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

ISSN 1814-1196

№ 2 (55)

2014

УДК 681.51(06)
Н 76

Редакционная коллегия

Главный редактор

Пустовой Николай Васильевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Зам. главного редактора

Вострецов Алексей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Денисов Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Нагоряков Владимир Елиферьевич, д-р техн. наук, проф., г. Новосибирск

Ответственный секретарь

Воевода Александр Александрович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Члены редколлегии

Алаин Бриллиард, д-р, проф., университет Мюлуза, Франция

Алексеев Сергей Владимирович, д-р физ.-мат. наук, проф., г. Новосибирск

Алиферов Александр Иванович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Виротайнен Вели Матти, проф., Технологический университет Лаппеэнранта, Финляндия

Воробьев Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф., СПИИРАН, г. Санкт-Петербург

Воронин Владимир Викторович, д-р техн. наук, доцент, ТОГУ, г. Хабаровск

Воропай Николай Иванович, д-р техн. наук, проф., НИУ ИрГТУ, г. Иркутск

Воскобойников Юрий Евгеньевич, д-р техн. наук, проф., Сибстрин, г. Новосибирск

Гайдук Анатолий Романович, д-р техн. наук, проф., ЮФУ, г. Таганрог

Григорьев Юрий Дмитриевич, д-р техн. наук, проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург

Зиновьев Геннадий Степанович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Куцкий Николай Николаевич, д-р техн. наук, проф., НИУ ИрГТУ, г. Иркутск

Луни Серджио, д-р, проф., Падуанский университет, Италия

Мальишенко Александр Максимович, д-р техн. наук, проф., ТПУ, г. Томск

Мухомад Юрий Федорович, д-р техн. наук, проф., ИрГУПС, г. Иркутск

Неизвестный Игорь Георгиевич, д-р физ.-мат. наук, проф., г. Новосибирск

Нейман Владимир Юрьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Очирбат Баатар, д-р, проф., Монгольский государственный университет науки и технологии, Монголия

Рубан Анатолий Иванович, д-р техн. наук, проф., СФУ, г. Красноярск

Рылов Анатолий Игоревич, д-р физ.-мат. наук, Институт математики им. Соболева, г. Новосибирск

Фомин Василий Михайлович, д-р физ.-мат. наук, проф., г. Новосибирск

Хабаров Валерий Иванович, д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск

Хи Жаохуи, Харбинский университет науки и технологии, Китай

Хлебников Михаил Владимирович, д-р физ.-мат. наук, ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва

Чичиндаев Александр Васильевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Щетинин Виталий, д-р, проф., Университет Бедфордшир, Великобритания

Адрес редакции: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, VII корп., ком. 409, 417

Тел. (383) 346-56-88, тел. ф. (383) 344-49-98

E-mail: ucit@ucit.ru

Web Site: <http://journals.nstu.ru/vestnik/>

Editorial Adress: K. Marx street, 20, Novosibirsk, 630073, Russia

УДК 681.51(06)

© Коллектив авторов, 2014

© Новосибирский государственный
технический университет, 2014

**НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК
НОВОСИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

ISSN 1814-1196

№ 2 (55)

2014

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ

Бакиров Ж.Б., Таткеева Г.Г., Ахмедиев С.К. Виброзащита оператора транспортных средств	7
Гайдук А.Р., Гуренко Б.В., Плаксиенко Е.А. К синтезу систем управления с частично заданной структурой по желаемым показателям качества	19
Гужов В.И., Сажин А.И., Сажин И.А. Управление состоянием хладагента в конденсаторе холодильной парокомпрессионной установки для интенсификации теплоотдачи	30
Куцкий Н.Н., Лукьянов Н.Д. Синтез системы управления многосвязным объектом с помощью генетического алгоритма на примере прямоточного котла	36
Плаксиенко В.С., Плаксиенко Н.Е., Сиденков А.С. Определение полосы захвата системы ФАПЧ при прямоугольной характеристике ФД	43
Решетников А.Н., Харитонов С.А. Управление синхронной электрической машиной с возбуждением от постоянных магнитов в стартер-генераторной установке	52

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Гибин И.С., Котенко В.П. Тест-объекты для контроля фотоприемных устройств в инфракрасной области спектра	60
Фаддеев А.В. Оценивание параметров регрессионных моделей в условиях гетероскедастичности неизвестной формы	67
Хамухин А.А. Совмещение вычисления интегрального вейвлет-спектра и непрерывного вейвлет-преобразования в задаче обнаружения узкополосных шумовых сигналов	77
Бочарникова М.Ю., Ханова А.А., Хортонен А.С. Анализ структуры и оценка сбалансированной системы показателей на основе когнитивной модели	86

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Ботыгин И.А., Забейворота А.В. Особенности развёртывания, настройки и применения инструментария apache hadoop на windows и unix-подобных операционных системах	97
Гатчин Ю.А., Ширяев С.В. Формирование признаков описания агентного множества оценки информационной безопасности систем	105
Дао Зуй Нам, Ивановский С.А. Приближённые алгоритмы локализации мобильного робота	109
Ехлаков Ю.П., Пермякова Н.В. Алгоритмическое обеспечение поддержки принятия решений по управлению рисками программных проектов	122

ФИЗИКА И МЕХАНИКА

Белоусов А.П. Расширение функциональных возможностей <i>PIV</i> -систем с низким временным разрешением	132
Иванов Б.И., Oelsner G. Компактный многоканальный криогенный фильтр нижних частот с широкой полосой заграждения для систем детектирования высокочувствительных сверхпроводящих устройств на основе эффекта Джозефсона.....	139
Украинец В.Н., Гирнис С.Р., Алигожина Д.А., Тлеулесов А.К. Влияние параметров движущейся в подземном трубопроводе периодической нагрузки на напряжённо-деформированное состояние окружающего его массива.....	148
Чёсов Ю.С., Зверев Е.А. Методика нанесения плазменных износостойких покрытий...	156

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Голдаев С.В., Хушвактов А.А. Моделирование процесса осушения воздуха слоем силикагеля, используемого при консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС..	166
---	-----

*ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА
И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ*

Жилина Н.А., Лыкин А.В. Расчет нагрузочных потерь электрической энергии вероятностно-статистическим методом	176
--	-----

СООБЩЕНИЯ

Иванов А.В., Рева И.Л., Трушин В.А., Тудэвдагва У. Корректировка методики оценки защищенности речевой информации от утечки по техническим каналам в условиях форсирования речи	183
---	-----

Редактор *Н.А. Санцевич*
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Журнал зарегистрирован Комитетом РФ по печати. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № 77–1599 от 10 февраля 2000 г.
Журнал реферирован в ВИНТИ (<http://www.2.viniti.ru>)
Лицензия ИД 04303 от 20.03.01. Подписано в печать 17.06.2014. Выход в свет 20.06.2014.
Формат 70 × 108 1/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экземпляров.
Уч.-изд. л. 16,8. Печатных листов 12,0. Издательский № 104. Заказ № 795.
Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

SCIENCE BULLETIN OF THE NOVOSIBIRSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

ISSN 1814-1196

№ 2 (55)

2014

УДК 681.51(06)
H 76

Editorial board

Chief editor

Pustovoi N. V., Doctor of Engineering, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Deputy chief editor

Vostretsov A. G., Doctor of Engineering, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Denisov V. I., Doctor of Engineering, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Nakoryakov V. E., Doctor of Engineering, Institute of Thermophysics, Novosibirsk, RF

Executive Secretary

Voevoda A. A., Doctor of Engineering, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

The members of the editorial Board

Brillard Alain, Doctor of Science, Universite de Haute Alsace, Mulhouse, France

Alekseenko S. V., Doctor of physical-technical Sciences, Institute of Thermophysics, Novosibirsk, RF

Alifjerov A. I., Doctor of Engineering, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Virolainen Veli Matti, professor, Lappeenranta Teknillinen Yliopisto, Finland

Vorob'ev V. I., Doctor of Engineering, St. Petersburg Institute for Informatics and automation of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, RF

Voronin V.V., Doctor of Engineering, Pacific national University, Khabarovsk, RF

Voropay N. I., Doctor of Engineering, National research Irkutsk state technical University, Irkutsk, RF

Voskoboinikov Yu E., Doctor of Engineering, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, RF

Gaiduk A. R., Doctor of Engineering, Southern Federal University, Taganrog, RF

Grigor'ev Iu. D., Doctor of Engineering, Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, RF

Zinoviev G. S., Doctor of Engineering, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Kutsyi N. N., Doctor of Engineering, National research Irkutsk state technical University, Irkutsk, RF

Lupi Sergio, Doctor of Science, Universita degli Studi di Padova, Padua, Italy

Malysenko A. M., Doctor of Engineering, national research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, RF

Mukhopad Iu. F., Doctor of Engineering, Irkutsk state University of railway engineering, Irkutsk, RF

Neizvestnyi I. G., Doctor of physico-mathematical Sciences, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Neiman V. Yu., Doctor of Engineering, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Ochirbat Baatar, Doctor of Science, Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia

Ruban A. I., Doctor of Engineering, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, RF

Rylov A. I., Doctor of physico-mathematical Sciences, Sobolev Institute of Mathematics, Novosibirsk, RF

Fomin V. M., Doctor of physico-mathematical Sciences, Khristianovich institut of theoretical and applied mechanics, Novosibirsk, RF

Khabarov V. I., Doctor of Engineering, Siberian Transport University, Novosibirsk, RF

Xi Zhaohui, Harbin University of science and technology, China

Khlebnikov M. V., Doctor of physico-mathematical Sciences, Institute of Control Sciences, Moscow, RF

Chichindaev A. V., Doctor of Engineering, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Schetinin V., Doctor of Science, University of Bedfordshire, Luton, United Kingdom

Editorial Adress: K. Marx street, 20, Novosibirsk, 630073, Russia
e-mail: ucit@ucit.ru

Web Site: <http://journals.nstu.ru/vestnik/>

УДК 681.51(06)

© Authors, 2014

© Novosibirsk state technical university, 2014

**SCIENCE BULLETIN
OF THE NOVOSIBIRSK STATE
TECHNICAL UNIVERSITY**

ISSN 1814-1196

№ 2 (55)

2014

CONTENTS

AUTOMATIC CONTROL AND REGULATION

Bakirov Zh.B., Tatkeeva G.G., Akhmediyev S.K. Vibroprotection of transport vehicle operators	7
Gaiduk A.R., Gurenko B.V., Plaksienko E.A. Design of control systems with a partially specified structure based on desirable performance.....	19
Guzhov V.I., Sazhin A.I., Sazhin I.A. Control of the refrigerant state in the condenser of the refrigeration vapor compression system for heat transfer enhancement.....	30
Kutsyi N.N., Iukyanov N.D. Control system synthesis by a multivariable object using the genetic algorithm (on the example of the once-through boiler)	36
Plaksienko V.S., Plaksienko N.E., Sidenkov A.S. The PLL capture range with the PD rectangular characteristic	43
Reshetnikov A.N., Kharitonov S.A. Control of the permanent magnet synchronous machine with an integrated starter-generator set	52

INFORMATION PROCESSING

Gibin I.S., Kotenko V.P. Test-objects for measuring of photoreceivers in the infrared spectrum range	60
Faddeenkov A.V. Estimation of regression model parameter under heteroskedasticity of an unknown form	67
Khamukhin A.A. Concurrent computation of the integrated wavelet spectrum and continuous wavelet transform when detecting narrowband noise signals.....	77
Bocharnikova M.Yu., Khanova A.A., Khortonen A.S. The structure analysis and assessment of the Balanced indicator system based on the cognitive model	86

MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES

Botygin I.A., Zabeyvorota A.V. Features of deployment, configuration and application of the apache hadoop tools for windows and unix-like operating systems.....	97
Gatchin Y.A., Shiryaev S.V. Formation of features for describing an agent set of system information security assessment	105
Dao Duy Nam, Ivanovskiy S.A. Approximation algorithms for the mobile robot localization	109
Ekhlakov Iu.P., Permiakova N.V. Algorithmic support of making decisions on software project risk management	122

PHYSICS AND MECHANICS

Belousov A.P. Enhancement of possibilities of low time resolution PIV systems	132
Ivanov B.I., Oelsner G. A Compact multichannel wide stopband cryogenic low-pass filter for superconducting Josephson circuit readout	139
Ukrainets V.N., Girnis S.R., Aligozhina D.A., Tleulessov A.K. Influence of parameters of a periodic load moving in the underground pipeline on the tense-deformed condition of the surrounding massif.....	148
Chesov Yu.S., Zverev E.A. A Technique of wear-resistant plasma coating spraying.....	156

THERMAL POWER ENGINEERING

Goldaev S.V., Khushvaktov A.A. Simulation of the dehumidification air process by a silica gel layer used for TPP steam and water tract unit protection	166
---	-----

*ELECTROMECHANICS, ELECTROENERGETICS
AND ELECTRICAL EQUIPMEN*

Zhilina N.A., Lykin A.V. Calculations of electric energy power losses by the probabilistic-statistical method	176
--	-----

SHORT PAPERS

Ivanov A.V., Reva I.L., Trushin V.A., Tudevtagva U. Corrected methods for the assessment of audio information security against leakage through engineering channels for forced speech	183
--	-----

Editor *N.A. Santsevich*
Computer imposition *S.I. Tkacheva*

The journal is registered by Russian Federation Committee on the press.
The certificate on registration of mass media of PI No. 77-1599 of February 10, 2000.
Journal referenced in VINITI (<http://www.2.viniti.ru>)
License ID 04303 from 20.03.01. Signed in print 17.06.2014. Format 70 × 108 1/16
Offset Paper. Circulation is 300 copies. Educational-ed. liter. 16,8. printed pages 12,0.
Publishing number 104. Order number 795.

It is printed in printing house of Novosibirsk state technical university
630073, Novosibirsk, Karl Marx Avenue, 20

УДК 539.3

Влияние параметров движущейся в подземном трубопроводе периодической нагрузки на напряжённо-деформированное состояние окружающего его массива¹

В.Н. УКРАИНЕЦ¹, С.Р. ГИРНИС², Д.А. АЛИГОЖИНА³, А.К. ТЛЕУЛЕСОВ⁴

¹ 140008, Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, д. т. н., профессор, e-mail: vitnikukr@mail.ru

² 140008, Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, к. т. н., доцент, e-mail: girnis@mail.ru

³ 140008, Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, магистрант, e-mail: aligojina@mail.ru

⁴ 140008, Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, ст. преподаватель, e-mail: askaralek66@mail.ru

На основе решения задачи о действии подвижной периодической нагрузки на толстостенную круговую цилиндрическую оболочку в упругом полупространстве проведен численный анализ влияния скорости и периода равномерно движущейся в подземном трубопроводе нормальной осесимметричной синусоидальной нагрузки на напряжённо-деформированное состояние окружающего его породного массива. Движение оболочки и полупространства описывается динамическими уравнениями теории упругости в подвижной системе координат, связанной с нагрузкой. Вектора смещений выражаются через потенциалы Ламе. Для стационарного решения задачи используется метод неполного разделения переменных и метод разложения потенциалов на плоские волны и плоских волн в ряды по цилиндрическим функциям. Решение получено для скоростей движения нагрузки, не достигающих скорости волны Рэлея в полупространстве. При проведении компьютерных экспериментов рассчитаны прогибы земной поверхности над трубопроводом мелкого заложения и компоненты напряженно-деформированного состояния массива на контуре поперечного сечения трубопровода при различных скоростях и периодах нормальной осесимметричной синусоидальной нагрузки. Результаты расчетов представлены в виде таблиц. Анализируется влияние скорости движения нагрузки и ее периода на напряженно-деформированное состояние окружающего трубопровод породного массива. Установлен критерий для возможности использования более простой расчетной схемы подземного трубопровода.

Ключевые слова: подземный трубопровод, породный массив, земная поверхность, цилиндрическая оболочка, упругое полупространство, периодическая нагрузка, подвижная нагрузка, скорость движения нагрузки, напряженно-деформированное состояние

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия широкое развитие получило строительство подземных магистральных трубопроводов, обеспечивающих транспортировку практически всего объема добываемого природного газа, большей части нефти и различных грузов. Наряду со статическим расчётом таких сооружений необходим их динамический расчёт. Среди динамических нагрузок на подземные трубопроводы следует выделить транспортные нагрузки (подвижные нагрузки, передаваемые сооружению транспортируемыми по нему объектами). В качестве основных модельных задач, используемых для динамических расчётов подземных трубопроводов на транспортную нагрузку, обычно рассматриваются задачи о действии подвижных нагру-

¹ Статья получена 29 января 2014 г.

зок на круговую цилиндрическую оболочку 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 отражённых волн [1–7].

1. ПОСТАНОВКА И АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Используя для исследований модельный подход, представим подземный трубопровод как бесконечно длинную круговую цилиндрическую 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 наружной поверхности оболочки R_1 ($R_1 < h$), радиус внутренней поверхности – R_2 . Контакт между оболочкой и окружающим её массивом полагаем жестким. 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 оболочке и окружающей её среде (дозвуковой случай). Физико-механические свойства массива и оболочки характеризуются соответственно следующими постоянными: $\nu_1, \mu_1, \rho_1; \nu_2, \mu_2, \rho_2$, где ν_k – коэффициент Пуассона, μ_k – модуль сдвига, ρ_k – плотность ($k = 1, 2$). В дальнейшем индекс $k = 1$ относится к массиву, а $k = 2$ – к оболочке.

Определим реакцию оболочки и окружающего её массива на данную подвижную нагрузку, используя для описания их движения динамические уравнения теории упругости в подвижной системе координат $\eta = z - ct$ [1]:

$$\left(\frac{1}{M_{pk}^2} - \frac{1}{M_{sk}^2} \right) \text{grad div } \mathbf{u}_k + \frac{1}{M_{sk}^2} \nabla^2 \mathbf{u}_k = \frac{\partial^2 \mathbf{u}_k}{\partial \eta^2}, \quad k = 1, 2, \quad (1)$$

где $M_{pk} = c/c_{pk}$, $M_{sk} = c/c_{sk}$ – числа Маха, $c_{pk} = \sqrt{(\lambda_k + 2\mu_k)/\rho_k}$, $c_{sk} = \sqrt{\mu_k/\rho_k}$ – скорости распространения волн расширения – сжатия и сдвига в массиве ($k = 1$) и оболочке ($k = 2$); $\lambda_k = 2\mu_k\nu_k / (1 - 2\nu_k)$, \mathbf{u}_k – векторы смещений точек массива и оболочки, ∇^2 – оператор Лапласа.

Выражая \mathbf{u}_k через потенциалы Ламе [8]

$$\mathbf{u}_k = \text{grad } \phi_{1k} + \text{rot}(\phi_{2k} \mathbf{e}_\eta) + \text{rot rot}(\phi_{3k} \mathbf{e}_\eta), \quad k = 1, 2, \quad (2)$$

преобразуем уравнения (1) к виду

$$\nabla^2 \phi_{jk} = M_{jk}^2 \frac{\partial^2 \phi_{jk}}{\partial \eta^2}, \quad j = 1, 2, 3, \quad k = 1, 2. \quad (3)$$

Здесь $M_{1k} = M_{pk}$, $M_{2k} = M_{3k} = M_{sk}$.

Используя (2) и закон Гука, можно получить выражения для компонент напряжённо-деформированного состояния (НДС) массива ($k = 1$) и оболочки ($k = 2$) как функции от ϕ_{jk} , $j = 1, 2, 3$.

Таким образом, для определения компонент НДС оболочки и окружающей её упругой среды необходимо решить уравнения (3), используя следующие граничные условия:

– для свободной от нагрузок поверхности полупространства ($x = h$)

$$\sigma_{xx1} = \sigma_{xy1} = \sigma_{x\eta1} = 0; \quad (4)$$

– для оболочки и контактирующего с ней массива

$$\text{при } r = R_1 \quad u_{j1} = u_{j2}, \quad \sigma_{rj1} = \sigma_{rj2}, \quad \text{при } r = R_2 \quad \sigma_{rj2} = P_j(\theta, \eta), \quad j = r, \theta, \eta. \quad (5)$$

Здесь $\sigma_{xx1}, \sigma_{xy1}, \sigma_{x\eta1}; \sigma_{rj1}, \sigma_{rj2}$ – компоненты тензоров напряжений, u_{j1}, u_{j2} – компоненты векторов перемещений, $P_j(\theta, \eta)$ – составляющие интенсивности подвижной нагрузки $P(\theta, \eta)$.

Рассмотрим случай синусоидальной подвижной нагрузки с произвольной зависимостью от угловой координаты

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

где константа ξ определяет период $T = 2\pi/\xi$ действующей нагрузки.

Потенциалы Φ_{jk} также будем искать в виде периодических по η функций

$$\Phi_{jk}(r, \theta, \eta) = \Phi_{jk}(r, \theta) e^{i\xi\eta}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (3), получим

$$\nabla_2^2 \Phi_{jk} - m_{jk}^2 \xi^2 \Phi_{jk} = 0, \quad j = 1, 2, 3, \quad k = 1, 2, \quad (8)$$

где $m_{jk}^2 = 1 - M_{jk}^2$, $m_{1k} \equiv m_{pk}$, $m_{2k} = m_{3k} \equiv m_{sk}$, ∇_2^2 – двумерный оператор Лапласа.

В дозвуковом случае $M_{sk} < 1$ ($m_{sk} > 0$, $k = 1, 2$), и мы приходим к известным решениям [1] уравнений (8)

$$\Phi_{jk} = \Phi_{jk}^{(1)} + \Phi_{jk}^{(2)}, \quad j = 1, 2, 3, \quad k = 1, 2, \quad (9)$$

где:

– для полупространства

$$\begin{aligned} \Phi_{j1}^{(1)} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{nj} K_n(k_{j1}r) e^{in\theta}, \\ \Phi_{j1}^{(2)} &= \int_{-\infty}^{\infty} g_j(\xi, \zeta) \exp\left(iy\zeta + (x-h)\sqrt{\zeta^2 + k_{j1}^2}\right) d\zeta; \end{aligned} \quad (10)$$

– для оболочки

$$\begin{aligned} \Phi_{j2}^{(1)} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{nj+3} K_n(k_{j2}r) e^{in\theta}, \\ \Phi_{j2}^{(2)} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{nj+6} I_n(k_{j2}r) e^{in\theta}. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь $I_n(kr)$, $K_n(kr)$ – функции Бесселя первого и второго рода от мнимого аргумента, $k_{j1} = |m_{j1}\xi|$, $k_{j2} = |m_{j2}\xi|$, $j = 1, 2, 3$; $g_j(\xi, \zeta)$, a_{n1}, \dots, a_{n9} – неизвестные функции и коэффициенты, подлежащие определению.

Аналогично рассмотренной в [1] задачи о действии бегущей нагрузки на круговую полость в упругом полупространстве, в данном случае представление потенциалов в форме (9) с использованием граничных условий (4) и (5), при скоростях нагрузки меньших, чем скорость волны Рэлея c_R в рассматриваемой среде, приводит к системам линейных алгебраических уравнений с определителями $\Delta_n(\xi, c)$ относительно неизвестных коэффициентов a_{nJ} ($J = 1, 2, 3, \dots, 9$), для решения которых может быть использован метод последовательных отражений. Если определители $\Delta_n(\xi, c)$ не равны нулю, определив коэффициенты a_{nJ} , можно вычислить компоненты напряжённо-деформированного состояния оболочки и окружающей её среды.

2. ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НДС ПОРОДНОГО МАССИВА. ВЫВОДЫ

Исследуем влияние на напряжённо-деформированное состояние окружающего трубопровод массива скорости движения c и периода $T = 2\pi/\xi$ 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 с характеристиками: $\nu_2 = 0,3$, $\mu_2 = 8,08 \cdot 10^{10}$ Па, $\rho_2 = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³; $R_1 = 0,61$ м, $R_2 = 0,59$ м [9]. Принимаем небольшую глубину заложения трубопровода $h = 2R_1$. Контакт трубопровода с массивом полагаем жёстким. Для исследований возьмём породы с различными механическими свойствами [10]:

- известняк – $\nu_1 = 0,25$, $\mu_1 = \mu = 2,8 \cdot 10^3$ МПа, $\rho_1 = 2,65 \cdot 10^3$ кг/м³, $c_{s1} = 1028$ м/с; $c_R = 945$ м/с;
- алевролит – $\nu_1 = 0,28$, $\mu_1 = \mu = 4,69 \cdot 10^3$ МПа, $\rho_1 = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м³, $c_{s1} = 1318$ м/с; $c_R = 1218$ м/с.

В табл. 1 помещены результаты расчётов максимальных прогибов $u_x = u_{x1}\mu/P_A$ ($\eta = y = 0$, $x = h$) земной поверхности при различных скоростях c и периодах T нагрузки. Расчеты проводились для алевролита.

Таблица 1

Максимальные прогибы u_x земной поверхности

c, м/с	T, м				
	2π	π	π/2	π/4	π/8
	u_x , м				
100	0,204	0,124	0,036	0,003	0,000
400	0,218	0,136	0,041	0,004	0,000
600	0,232	0,153	0,050	0,005	0,000

Из анализа результатов расчётов следует, что увеличение скорости движения нагрузки ведет к увеличению прогибов земной поверхности. С уменьшением T прогибы уменьшаются и при $T = \pi/4$ м, т. е. 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. При дальнейшем уменьшении T толщина динамически активного слоя становится меньше. Таким образом, в случае $T/h < 0,6$ для расчёта трубопровода на данную нагрузку можно использовать более простую расчетную схему – оболочку в безграничном упругом пространстве.

В табл. 2, 3 для нагрузки с периодом $T = \pi/8$ м приведены результаты расчётов напряжённо-деформированного состояния рассматриваемых породных массивов на контуре поперечного сечения трубопровода в подвижной координатной плоскости $x\eta$, произведенные по двум расчетным схемам (РС): 1 – оболочка в упругом полупространстве, 2 – оболочка в упругом пространстве. Числа Маха $M_R = c/c_R$ для пород – 0,9. В таблицах приняты следующие обозначения: $u_r = u_{r1}\mu/P_A$, м, $\sigma_{rr} = \sigma_{rr1}/P_A$, $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\theta\theta 1}/P_A$, $\sigma_{\eta\eta} = \sigma_{\eta\eta 1}/P_A$.

Таблица 5

**Компоненты НДС массива алеврولита на контуре поперечного сечения трубопровода
($T = 2\pi$ м, $c = 122$ м/с)**

РС	Комп. НДС	θ , град.						
		0	30	60	90	120	150	180
1	u_r°	0,289	0,240	0,184	0,137	0,134	0,131	0,141
	σ_{rr}°	-0,720	-0,388	-0,599	-0,440	-0,643	-0,485	-0,664
	$\sigma_{\theta\theta}^\circ$	0,607	0,484	0,610	0,557	0,571	0,404	0,448
	$\sigma_{\eta\eta}^\circ$	-0,212	-0,158	-0,184	-0,150	-0,194	-0,188	-0,221
2	u_r°	0,155	0,155	0,155	0,155	0,155	0,155	0,155
	σ_{rr}°	-0,586	-0,586	-0,586	-0,586	-0,586	-0,586	-0,586
	$\sigma_{\theta\theta}^\circ$	0,432	0,432	0,432	0,432	0,432	0,432	0,432
	$\sigma_{\eta\eta}^\circ$	-0,189	-0,189	-0,189	-0,189	-0,189	-0,189	-0,189

ВЫВОДЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Ержанов Ж.С., Айталиев Ш.М., Алексеева Л.А.** Динамика тоннелей и подземных трубопроводов. – Алма-Ата: Наука, 1989. – 240 с.
- [2] **Алексеева Л.А.** Фундаментальные решения уравнений движения упругого полупространства при дозвуковых бегущих нагрузках // Изв. Нац. акад. наук Респ. Казахстан. Сер. физ.-мат. – 2002. – № 5. – С. 53–58.
- [3] **Алексеева Л.А.** Действие стационарных бегущих нагрузок в упругом полупространстве // Мат. журн. – Алма-Ата, 2003. – Т. 3, № 1 (7). – С. 18–25.
- [4] **Украинец В.Н.** Динамика тоннелей и трубопроводов мелкого заложения под воздействием подвижных нагрузок. – Павлодар: Изд-во НИЦ ПГУ им. С. Торайгырова, 2006. – 123 с.
- [5] **Украинец В.Н.** Реакция упругого полупространства на движущуюся по подкрепленной полости скручивающую нагрузку // Тр. НГАСУ. – 2007. – Т. 10, № 1 (39). – С. 43–50.
- [6] **Алексеева Л.А., Украинец В.Н.** Динамика упругого полупространства с подкрепленной цилиндрической полостью при подвижных нагрузках // Прикладная механика. – 2009. – Т. 45, № 9. – С. 75–85.
- [7] **Украинец В.Н.** Реакция земной поверхности на движущуюся в тоннеле нагрузку // Изв. РАН. Механика твёрдого тела. – 2009. – № 2 (578). – С. 101–107.
- [8] **Новацкий В.** Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
- [9] **Бородавкин П.П.** Подземные магистральные трубопроводы. – М.: Недра, 1982. – 384 с.
- [10] **Булычев Н.С.** Механика подземных сооружений в примерах и задачах. – М.: Недра, 1989. – 270 с.

Украинец Виталий Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды Павлодарского государственного университета Министерства образования и науки Республики Казахстан. Основное направление научных исследований – динамика подземных сооружений. Имеет около 150 публикаций, в том числе 3 монографии. E-mail: vitnikukr@mail.ru

Гирнис Светлана Римонтовна, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники и программирования Павлодарского государственного университета Министерства образования и науки Республики Казахстан. Основное направление научных исследований – динамика подземных сооружений. Имеет более 70 публикаций, в том числе 3 монографии. E-mail: girnis@mail.ru

Алигожина Дина Амангельдыевна, магистрант кафедры безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды Павлодарского государственного университета Министерства образования и науки Республики Казахстан. Основное направление научных исследований – безопасность эксплуатации подземных магистральных нефтепроводов. Имеет 3 публикации. E-mail: aligोजना@mail.ru

Тлеулесов Аскар Каримжанович, старший преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды Павлодарского государственного университета Министерства образования и науки Республики Казахстан. Основные направления научных исследований – строительные материалы, динамика подземных сооружений. Имеет более 20 публикаций. E-mail: askaralek66@mail.ru

Influence of parameters of a periodic load moving in the underground pipeline on the tense-deformed condition of the surrounding massif*

V.N. UKRAINETS¹, S.R. GIRNIS², D.A. ALIGOZHINA³, A.K. TLEULESSOV⁴

¹ Pavlodar State University. 64, Lomova St., Pavlodar, 140008, Kazakhstan, D.Sc. (Eng.), professor, e-mail: vitnikukr@mail.ru

² Pavlodar State University. 64, Lomova St., Pavlodar, 140008, PhD (Eng.), associate professor, e-mail: girnis@mail.ru

³ Pavlodar State University. 64, Lomova St., Pavlodar, 140008, Kazakhstan, master student, e-mail: aligोजना@mail.ru

⁴ Pavlodar State University. 64, Lomova St., Pavlodar, 140008, Kazakhstan, senior teacher, e-mail: askaralek66@mail.ru

Based on the solved problem of an action of a moving periodic load on the thick-walled circular cylindrical cover in the elastic half-space, a numerical analysis of the effect of the velocity and the period of a normal axisymmetric sinusoidal load uniformly moving in the underground pipeline on the stress-deformed condition of the surrounding massif it is made. The movement of the shell and the half-space is described by dynamic equations of the elasticity theory in the load moving coordinates. Displacement vectors are expressed in terms of Lamé potentials. For a stationary solution of the problem, the method of incomplete separation of variables and the method of expansion of potentials into plane waves and plane waves into a series of cylindrical functions are used. The solution is obtained for load speeds that do not reach the velocity of the Rayleigh wave in a half-space. When conducting computer experiments, deflections of the ground surface above the pipeline of shallow laying as well as components of the stress-deformed condition of the pipeline cross section contour at various speeds and periods of a normal axisymmetric sinusoidal load are calculated. The results are presented in tabular form. The effect of the load movement speed and its period on the stress-deformed condition of the massif surrounding the pipeline is analyzed. A criterion for using a simpler design scheme of the underground pipeline is proposed.

Keywords: underground pipeline, massif, terrestrial surface, cylindrical shell, elastic half-space, periodic load, moving load, load speed, stress-deformed condition

REFERENCES

- [1] Erzhanov Zh.S., Aitaliev Sh.M., Alekseeva L.A. *Dinamika tonnelei i podzemnykh truboprovodov* [Dynamics of tunnels and underground pipelines]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1989. 240 p.
- [2] Alekseeva L.A. Fundamental'nye reshenija uravnenij dvizhenija uprugogo poluprostranstva pri dozvukovyh begushhij nagruzkah [Fundamental solutions of the equations of movement of an elastic half-space at subsonic running loadings]. *Izvestija NAN RK* [Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of physical-mathematical], 2002, no. 5. pp. 53-58.
- [3] Alekseeva L.A. Dejstvie stacionarnykh begushhij nagruzk v uprugom poluprostranstve [Action stationary running loads in an elastic half-space]. *Matematicheskij zhurnal – Mathematical Journal*, 2003, no. 1, pp. 18-25.
- [4] Ukrainets V.N. *Dinamika tonnelej i truboprovodov melkogo zalozenija pod vozdejstviem podvizhnyh nagruzk* [Dynamics of tunnels and pipelines under the influence of moving loads]. Pavlodar, Pavlodar State University named Torajgyrov Publ., 2006. 123 p.
- [5] Ukrainets V.N. Reakcija uprugogo poluprostranstva na dvizhushhujusja po podkreplennoj polosti skrudivajushhuju nagruzku [Reaction of the elastic half-space to twisting load moving along reinforced by cavity]. *Trudy NGASU* [Proc. of the Novosibirsk State Architectural and Construction University], 2007, no. 1, pp. 43-50.

* Manuscript received January 29, 2014.

[6] Alekseeva L.A., Ukrainets V.N. Dinamika uprugogo poluprostranstva s podkreplenoj cilindricheskoj polost'ju pri podviznyh nagruzkah [Dynamics of elastic half-space reinforced by a cylindrical cavity under moving loads]. *Prikladnaja mehanika – International Applied Mechanics*, 2009, no. 9. – pp. 75-85.

[7] Ukrainets V.N. Reakcija zemnoj poverhnosti na dvizhushhujusja v tonnele nagruzku [Earth surface response to a load moving in a tunnel]. *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Mehanika tverdogo tela – Mechanics of Solids: a Journal of Russian Academy of Sciences*, 2009, no. 2 (578), pp. 101-107.

[8] Novackij V. *Teorija uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow, Mir Publ., 1975. 872 p.

[9] Borodavkin P.P. *Podzemnye magistral'nye truboprovody* [Underground pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 384 p.

[10] Bulychev N.S. *Mekhanika podzemnykh sooruzhenii v primerakh i zadachakh* [Mechanics of underground structures in examples and problems]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 270 p.