

DOI: 10.34220/2311-8873-2022-3-9



УДК 539.3.004: 621.793.79

05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ
ВОЛН В ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ
СРЕДЕ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ
КОМПОЗИТНОГО ПОКРЫТИЯ
ПЛАЗМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ**

Жачкин Сергей Юрьевич

д.т.н., профессор кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства Воронежского государственного технического университета (ВГТУ), Воронеж, Россия

Пеньков Никита Алексеевич

к.т.н., начальник лаборатории ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

Кукарских Любовь Алексеевна

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

✉¹**Трифонов Григорий Игоревич**

младший научный сотрудник ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия, e-mail: trifonov_gi@mail.ru

Аннотация.

В трехкомпонентной среде при ее деформировании на волновой поверхности в продольном направлении распространяются упругие волны. В данной работе проводились исследования поведения упругих волн, их влияния на качество среды распространения в процессе формирования композитных покрытий при плазменном напылении. Составлена блок-схема для создания программного продукта, способствующего проведению теоретических исследований волновых процессов в трехкомпонентной среде.

**SIMULATION OF WAVE
PROPAGATION ACCELERATIONS
IN A THREE-COMPONENT
MEDIUM DURING THE FORMATION
OF A COMPOSITE COATING
PLASMA SPRAYING**

Sergey Yu. Zhachkin

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automated Equipment of Machine-Building Production of the Voronezh State Technical University, Russia

Nikita A. Penkov

Candidate of Technical Sciences, Head of the laboratory the Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Russia

Lyubov A. Kukarskikh

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior researcher The Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Russia

✉¹**Grigory I. Trifonov**

Junior researcher The Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Russia, e-mail: trifonov_gi@mail.ru

Annotation.

In a three-component medium, when it is deformed, acceleration waves propagate longitudinally on the wave surface. In this paper, the behavior of acceleration waves and their influence on the quality of the propagation medium during the formation of composite coatings during plasma spraying were investigated. A flowchart has been compiled to create a software product that promotes theoretical studies of wave processes in a three-component environment.

Ключевые слова: УПРУГИЕ ВОЛНЫ, ТРЕХКОМПОНЕНТНАЯ СРЕДА, ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ, ПОКРЫТИЕ, ПОРИСТОСТЬ СРЕДЫ.

Keywords: ACCELERATION WAVES, THREE-COMPONENT MEDIUM, PLASMA SPRAYING, COATING, POROSITY OF THE MEDIUM.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние исследования и актуальность работы

Современные разновидности газотермических процессов нанесения покрытий относятся к прогрессивным технологиям [1], широко используемым в машиностроении при изготовлении и восстановлении деталей. Среди них плазменное наиболее универсальным процессом является плазменное напыление и различные его виды, что обусловлено возможностью гибкостью регулирования в широких диапазонах режимов и напыляемых материалов. Однако, при этом до сих пор остаются неизученными теоретические вопросы, касающиеся технологии, в том числе, по адаптации плазменного напыления для использования при нанесении покрытий на профильные поверхности [1-3].

Особый интерес представляет изучение плазменных покрытий в аспекте рассмотрения их как трехфазных материалов, включающих газовую и жидкую фазы в порах покрытия. Актуальным является описание особенностей поведения материала напыления в реализующихся условиях технологии нанесения и упрочнения плазменных покрытий. Описать реальные процессы в трехфазных покрытиях при их формировании плазменным напылением математически сложно, и эта проблема недостаточно изучена. Она требует разработки математических моделей, способных адекватно отражать формирование пористых плазменных покрытий.

Проблеме изучения деформирования пористых трехфазных сред посвящен ряд работ выдающихся и известных ученых Л. Д. Ландау [4], Л. Я. Косачевского [5], Р. И. Нигматулина [6], Т. Томаса. [7] и др. Применительно к трехфазным покрытиям важными являются работы заслуженного ученого Био М. А. [8-10].

В аспекте изучения трехфазных пористых плазменных покрытий, прежде всего, важным является изучение распространения упругих волн в насыщенной газом и жидкостью пористой среде. В данной работе изучение формирования плазменных покрытий основано на использовании метода математической теории разрывов.

2 Материалы и методы

Поверхность деталей изделий машиностроения требует соответствия их свойств эксплуатационным воздействиям изнашивания коррозии в условиях статической и динамической нагрузок [11-13]. Нанесение и упрочнение плазменных покрытий позволяет решить эту задачу, а рассмотрение покрытия как трехфазной среды позволяет сделать это наиболее точно [14].

При деформировании пористой среды, насыщенной жидкостью и газом, происходят определенные диссипативные процессы, которые характеризуются движением жидкости и газа в деформируемой пористой среде [15-17]. Можно считать, что три фазы среды – упругая компонента, жидкость и газ являются сплошными, так как поры, вернее, их размеры малы по сравнению с размерами, при которых происходят существенные изменения параметры движения. При этом в любой точке пространства среды будет три вектора смещения. Параметры упругой волны в трехфазной пористой среде по параметрам напряжения, сил, действующих на жидкость и газ, и скорости перемещения фаз являются непрерывными. Частные производные данных параметров, однако, имеют разрывы.

В плазменном пористом покрытии в направлении распространения волновой поверхности будут существовать волны трех типов, скорости которых, а также скорость самой волновой поверхности, зависят от характеристик среды.

Используя полный тензор напряжений в теле, сил, действующих на газ и жидкость в порах, а также уравнения движения пористой среды, получим систему уравнений движения

трехкомпонентной среды относительно перемещений. Проведем преобразования, применим математическую теорию разрывов, кинематические и геометрические условия совместности первого порядка. Введем обозначения и запишем систему в безразмерном виде, которая будет иметь нетривиальные решения в виде трех скоростей упругих волн.

Раскрывая определитель, получим кубическое уравнение канонической формы относительно коэффициента x , представляющего собой отношение скорости продольных волн c_p к скорости распространения в продольном направлении волновой поверхности среды V_s :

$$ax^3 + bx^2 + cx + d = 0, \quad (1)$$

$$a = k_{11}k_{22}k_{33} - k_{11}k_{12}k_{13} - k_{12}^2k_{33} + k_{12}k_{13}^2 + k_{13}k_{12}^2 - k_{13}^2k_{22}, \quad (2)$$

$$b = -k_{11}k_{22}y_{33} - k_{11}k_{33}y_{22} + k_{11}k_{13}y_{23} + k_{11}k_{12}y_{23} + k_{12}k_{12}y_{33} + k_{12}k_{33}y_{12} - k_{12}k_{13}y_{13} - k_{12}k_{13}y_{23} - k_{13}k_{12}y_{23} - k_{13}k_{12}y_{12} + k_{13}k_{22}y_{13} + k_{13}k_{13}y_{22} - k_{22}k_{33}y_{11} + k_{12}k_{13}y_{11} + k_{12}k_{33}y_{12} - k_{13}^2y_{12} - k_{12}^2y_{13} + k_{13}k_{22}y_{13}, \quad (3)$$

$$c = k_{22}y_{11}y_{33} + k_{33}y_{11}y_{22} - k_{13}y_{11}y_{23} - k_{12}y_{11}y_{23} - k_{12}y_{12}y_{33} - k_{33}y_{12}^2 + k_{13}y_{12}y_{13} + k_{13}y_{12}y_{23} + k_{12}y_{13}y_{23} + k_{12}y_{12}y_{13} - k_{22}y_{13}^2 - k_{13}y_{13}y_{22} + k_{11}y_{22}y_{33} - k_{11}y_{23}^2 - k_{12}y_{12}y_{33} + k_{12}y_{13}y_{23} + k_{13}y_{12}y_{23} - k_{13}y_{13}y_{22}, \quad (4)$$

$$d = -y_{11}y_{22}y_{33} + y_{11}y_{23}^2 + y_{12}^2y_{33} - y_{12}y_{13}y_{23} - y_{12}y_{13}y_{23} + y_{13}^2y_{22}. \quad (5)$$

Безразмерные коэффициенты, $y_{11} \dots y_{33}$, $k_{11} \dots k_{33}$ вычисляются по формулам

$$y_{11} = \frac{\rho_{11}}{\rho}, y_{12} = \frac{\rho_{12}}{\rho}, y_{22} = \frac{\rho_{22}}{\rho}, y_{13} = \frac{\rho_{13}}{\rho}, y_{23} = \frac{\rho_{23}}{\rho}, y_{33} = \frac{\rho_{33}}{\rho}, \quad (6)$$

$$\rho = \rho_{11} + 2\rho_{12} + \rho_{22} + 2\rho_{13} + 2\rho_{23} + \rho_{33}, \quad (7)$$

$$k_{11} = \frac{\Lambda}{M}, k_{12} = \frac{(1-m)R_0^{(2)}}{M}, k_{22} = \frac{mR_0^{(2)}}{M}, k_{13} = k_{23} = \frac{(1-m)R_0^{(3)}}{M}$$

$$k_{33} = \frac{mR_0^{(3)}}{M}, M = \Lambda + 2(1-m)R_0^{(2)} + mR_0^{(2)} + 2(1-m)R_0^{(3)} + mR_0^{(3)}, \Lambda = \lambda + 2\mu, \quad (8)$$

где λ, μ – коэффициенты Ламе; $\rho_{11}, \rho_{22}, \rho_{33}$ – эффективные плотности твердой компоненты, жидкости и газа; $\mu_{12}, \mu_{13}, \mu_{23}$ – коэффициенты динамической связи твердого тела металла покрытия, жидкости и газа в порах (меньше 0); $R_0^{(2)}, R_0^{(3)}$ – модули сжимаемости жидкости и газа; m – пористость среды (принимает значения от 0 до 1).

Решение кубического уравнения находим, используя третий способ формул Кардана [18].

Изменяя характеристики среды можно моделировать поведение распространения волн. Отношение скорости распространения продольных волн к скорости распространения волновой поверхности среды $x = c_p / V_s$ зависит от пористости среды через безразмерные коэффициенты как функции плотности фаз и значений их динамической связи, сжимаемости жидкой и газовой составляющих среды. Для упрощения решения системы уравнений вводятся безразмерные коэффициенты, в том числе и k_{11} . Как видно из приведенных выше формул, коэффициент k_{11} является функцией пористости, модулей сжимаемости жидкости и газа, и свойств среды, характеризующихся коэффициентом Пуассона ν и модулем Юнга E через коэффициенты Ламе λ и μ .

Графики (рис. 1) построены при фиксированных значениях параметра пористости $m = 0,2, 0,4, 0,7, 0,9$ для каждого корня x_1, x_2, x_3 (среда трехфазная) с коэффициентами k_{11} , равными 0,51 (рис. 1, а) и 0,6 (рис. 1, б).

Кривые (рис. 1) наглядно показывают зависимость скорости распространения продольных волн от пористости. При увеличении пористости скорости становятся более плавными и практически параллельными. Пористость материалов, как их физико-механическая характеристика, влияет на прочность и долговечность [19, 20], что очень актуально в исследованиях и разработке новых образцов композитных материалов для плазменного напыления, новых методов диагностики.

3 Результаты исследований

По итогу проведенных математических преобразований с целью оценки зависимости упругих волн от характеристик среды, предсказания поведение волн и, соответственно, влияние их на ухудшение (разрушение) или улучшение качества среды распространения, была разработана блок-схема (рис. 2) для последующего создания программного продукта, позволяющего найти оптимальный вариант, сочетающий физико-механические свойства среды с характеристиками распространения волн, оказывающих воздействие на нее.

Разрабатываемый программный продукт на основе безразмерных коэффициентов, учитывающих пористость среды, эффективные плотности компонент среды, коэффициенты динамической связи трех фаз среды, модули сжимаемости жидкости и газа, позволяет вычислять три действительных различных корня уравнения, которые соответствуют скоростям продольных волн.

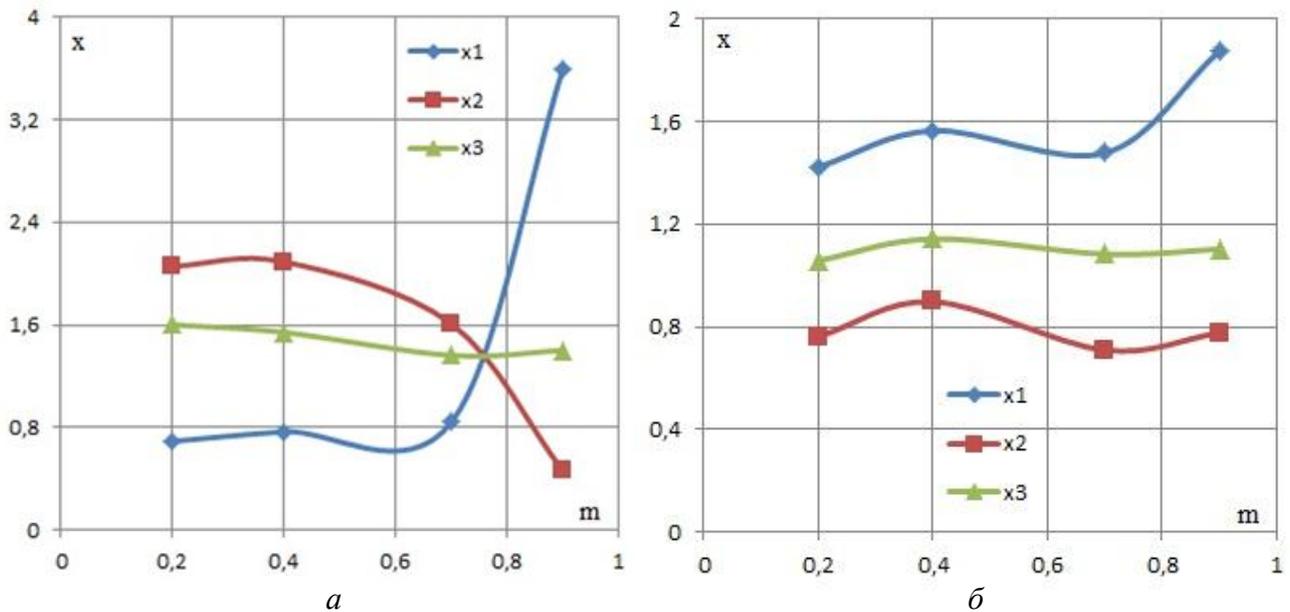


Рисунок 1 – Влияние пористости m среды на отношение скорости продольных волн к скорости волновой поверхности $x = c_p / V_s$ для значений параметра $k_{11} = 0,51$ (а) и $k_{11} = 0,6$ (б): x_1 , x_2 и x_3 – отношения c_p / V_s для трех фаз: металла, жидкости и газа соответственно

4 Обсуждение и заключение

На основе использования полного тензора напряжений в теле, сил, действующих на жидкость и газ в порах и уравнений движения пористой среды получена система уравнений движения трехкомпонентной среды относительно перемещений, имеющая нетривиальные решения в виде трех скоростей волн. Решением системы уравнений изучены зависимости скорости распространения продольных волн и скорости распространения волновой поверхности среды от пористости среды, пример которых представлен на рисунке 1.

Составленная блок схема для создания программного продукта, способствующего проведению теоретических исследований волновых процессов в трехкомпонентной среде

формирования композитного покрытия на поверхности детали позволяет разработать программный продукт, повышающий эффективность исследований поведения упругих волн по их влиянию на качество среды распространения в процессе формирования композитных покрытий при плазменном напылении.

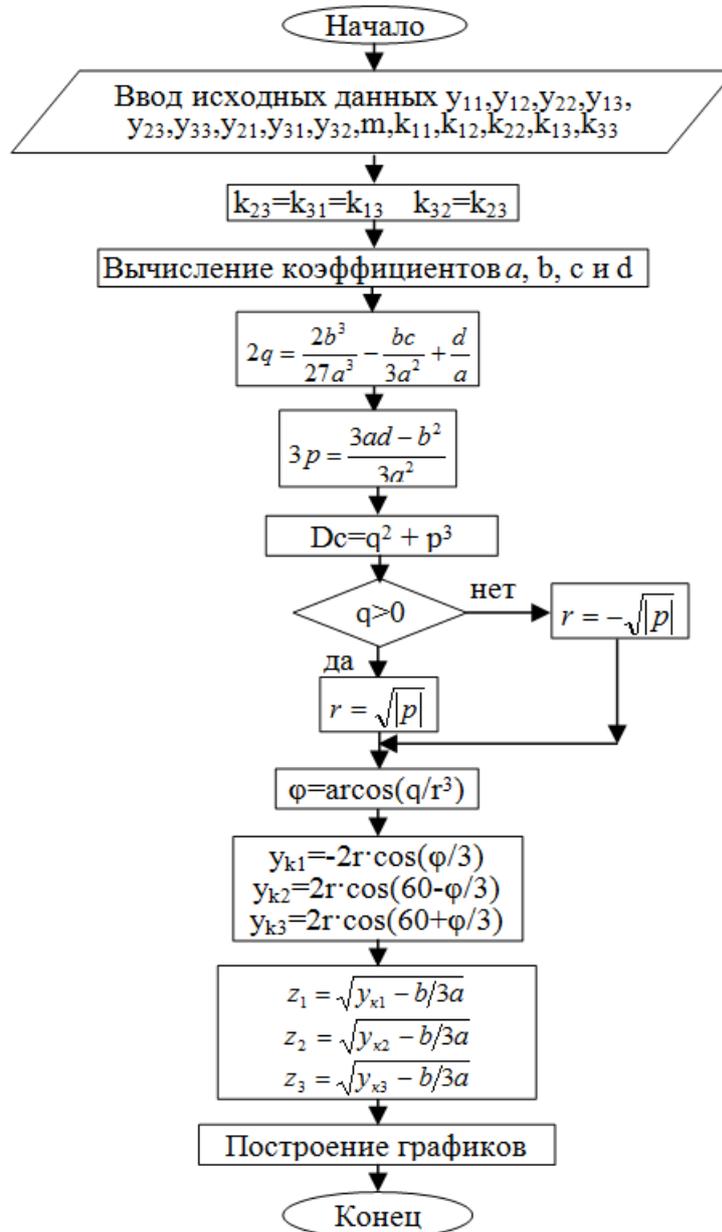


Рисунок 2 – Блок-схема (алгоритм) разрабатываемого программного продукта

Список литературы

- 1 Пузряков А. Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления / А. Ф. Пузряков. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Е. Баумана, 2008. – 360 с.
- 2 Ильющенко, А. Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / А. Ф. Ильющенко, А. И. Шевцов, В. А. Оковитый, Г. Ф. Громько. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 357 с.
- 3 Trifonov, G. I. Study of the features of the development of computer-aided design of functional coatings by plasma spraying / Grigory I. Trifonov, Lyubov A. Kukarskikh, Vladimir K.

Kiryanov, Dmitry O. Krikunov, Andrey V. Mikhalchenko // MATEC Web of Conferences 329, 02002 (2020). – pp. 1-6.

4 Ландау, Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1965. – 202 с.

5 Косачевский, Л. Я. О распространении упругих волн в двухкомпонентных средах / Л. Я. Косачевский // ПММ, Вып. 6, Т. 23. 1959. – С. 1115-1123.

6 Нигматулин, Р. И. Основы механики гетерогенных сред / Р. И. Нигматулин. – М. : Наука, 1978. – 336 с.

7 Томас Т. Пластическое течение и разрушение в твердых телах // М. : Мир, 1964. – 308 с.

8 Biot M. A. Theory propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid I. Low-Frequency Range. J. Acoust. Soc. America, 1956, vol. 28, № 2. – pp. 168-178.

9 Biot M. A. Theory propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher Frequency Range. J. Acoust. Soc. America, 1956, vol. 28, № 2. – pp. 179-191.

10 Biot M. A. Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media. Journal of Applied Physic, 1962, vol. 33, № 4. – pp. 1483-1498.

11 Чичинадзе А. В., Берлинер Э. М., Браун Э. Д. и др. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника). – М. : Машиностроение, 2003. – С. 107-139.

12 Комбалов В. С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов : справочник / под ред. К. В. Фролова, Е. А. Марченко. – М. : Машиностроение, 2008. – 384 с.

13 Леонов, С. Л. Моделирование износа наплавленных поверхностей деталей / С. Л. Леонов, А. А. Ситников, М. Е. Татаркин. – Ползуновский альманах, 2012, № 1. – С. 228-229.

14 Sharifullin S. N. Modeling of the influence of non-stationary waves in three-component medium in the formation of a plasma jet / S. N. Sharifullin, S. Yu. Zhachkin, G. I. Trifonov // Journal of Physics : Conf. Series. 2019. Т. 1328. (012098). DOI : 10.1088/1742-6596/1328/1/012098.

15 Поленов В. С. Основные уравнения динамического деформирования трехкомпонентных сред // Современные тенденции развития естествознания и технических наук : Сборник научных трудов по материалам МНПК. – Белгород, 2018. – С. 31-34.

16 Поленов, В. С. Распространение упругих волн в насыщенной вязкой жидкостью пористой среде / В. С. Поленов // ПММ. 2014. Т. 78. Вып. № 4. – С. 501-507.

17 Поленов, В. С. Нестационарные упругие волны в насыщенной жидкостью пористой среде / В. С. Поленов // Теоретическая и прикладная механика. Меж. научно-тех. сб. 2012. Вып. № 27, Минск. – С. 84-90.

18 Бронштейн И. Н. Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗОВ // М. : 1964. – 608 с.

19 Кудинов, В. В. Нанесение покрытий напылением / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров // М. : Metallurgy, 1992. – 432 с.

20 Постников, В. С. Внутреннее трение в металлах / В. С. Постников – М. : Metallurgy, 1974. – 351 с.

References

1 Puzryakov A. F. Theoretical foundations of plasma spraying technology / A. F. Puzryakov. – М. : Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2008. – 360 p.

2 Plyushenko A. F. Processes of formation of gas-thermal coatings and their modeling / A. F. Plyushenko, A. I. Shevtsov, V. A. Okovity, G. F. Gromyko. – Minsk : Belarus. navuka, 2011. – 357 p.

3 Trifonov G. I. Study of the features of the development of computer-aided design of functional coatings by plasma spraying / Grigory I. Trifonov, Lyubov A. Kukarskikh, Vladimir K. Kiryanov, Dmitry O. Krikunov, Andrey V. Mikhalchenko // MATEC Web of Conferences 329, 02002 (2020). – pp. 1-6.

- 4 Landau L. D. Theory of elasticity / L. D. Landau, E. M. Lifshits. – М. : Nauka, 1965. – 202 p.
- 5 Kosachevsky L. Ya. On the propagation of elastic waves in two-component media / L. Ya. Kosachevsky // PMM, Issue 6, Vol. 23. 1959. – pp. 1115-1123.
- 6 Nigmatulin R. I. Fundamentals of mechanics of heterogeneous media / R. I. Nigmatulin. – М. : Nauka, 1978. – 336 p.
- 7 Thomas T. Plastic flow and destruction in solids // Moscow : Mir, 1964. – 308 p.
- 8 Biot M. A. Theory propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid I. Low-Frequency Range. J. Acoust. Soc. America, 1956, vol. 28, № 2. – pp. 168-178.
- 9 Biot M. A. Theory propagation of elastic waves in a fluid- saturated porous solid. II. Higher Frequency Range. J. Acoust. Soc. America, 1956, vol. 28, № 2. – pp. 179-191.
- 10 Biot M. A. Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media. Journal of Applied Physic, 1962, vol. 33, № 4. – pp. 1483-1498.
- 11 Chichinadze A. V., Berliner E. M., Brown E. D., etc. Friction, wear and lubrication (tribology and tribotechnics). – Moscow : Mashinostroenie, 2003. – pp. 107-139.
- 12 Kombalov V. S. Methods and means of testing for friction and wear of structural and lubricants: handbook / edited by K. V. Frolov, E. A. Marchenko. – М. : Mashinostroenie, 2008. – 384 p.
- 13 Leonov S. L. Modeling of wear of deposited surfaces of parts / S. L. Leonov, A. A. Sitnikov, M. E. Tatarkin. – Polzunovsky Almanac, 2012, No. 1. – pp. 228-229.
- 14 Sharifullin S. N. Modeling of the influence of non-stationary waves in three-component medium in the formation of a plasma jet / S. N. Sharifullin, S. Yu. Zhachkin, G. I. Trifonov // Journal of Physics: Conf. Series. 2019. T. 1328. (012098). DOI : 10.1088/1742-6596/1328/1/012098.
- 15 Polenov V. S. Basic equations of dynamic deformation of three-component media // Modern trends in the development of natural sciences and technical sciences : A collection of scientific papers based on the materials of MNPC. – Belgorod, 2018. – pp. 31-34.
- 16 Polenov V. S. Propagation of elastic waves in a porous medium saturated with a viscous liquid / V. S. Polenov // PMM. 2014. Vol. 78. Issue No. 4. – pp. 501-507.
- 17 Polenov V. S. Unsteady elastic waves in a porous medium saturated with liquid / V. S. Polenov // Theoretical and applied mechanics. International Scientific and Technical Collection 2012. Issue No. 27, Minsk. – pp. 84-90.
- 18 Bronstein I. N., Semendyaev K. A. Handbook of mathematics for engineers and students of higher education institutions // М. : 1964. – 608 p.
- 19 Kudinov V. V. Deposition of coatings by spraying / V. V. Kudinov, G. V. Bobrov // М. : Metallurgy, 1992. – 432 p.
- 20 Postnikov V. S. Internal friction in metals / V. S. Postnikov – М. : Metallurgy, 1974. – 351 p.

© Жачкин С.Ю., Пеньков Н.А., Кукарских Л.А., Трифонов Г.И., 2021