

8. Глушков В. Е. Вытрамбованные фундаменты в грунтах со слабым подстилающим слоем / В. Е. Глушков, А. В. Глушков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 4. – С. 19–26. – EDN SFACDL.

9. Constructive and technological solutions for underground space safety amidst dense historical buildings and weak foundation soils / R. Mangushev, A. Osokin, I. Diakonov, F. Kalach // E3S Web of Conferences : International Scientific Conference “Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East” (AFE-2022), Tashkent, Uzbekistan, January, 25–28 2023. – Tashkent, Uzbekistan : EDP Sciences, 2023. – Vol. 371. – P. 02002. – DOI: 10.1051/e3sconf/202337102002. – EDN NUVLVM.

10. Деформации виброползучести водонасыщенных грунтов в процессе высокочастотного динамического воздействия / Р. А. Мангушев, И. П. Дьяконов, В. М. Полуниин, М. Р. Горкина // Жилищное строительство. – 2022. – № 3. – С. 45–56. – DOI: 10.31659/0044-4472-2022-3-45-55. – EDN SAMBRR.

© Н. В. Купчикова

**Ссылка для цитирования:**

Купчикова Н. В. Упрочнение слабого подстилающего слоя грунтового основания свайно-плитного фундамента из буронабивных свай // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2024. № 4 (50). С. 77–87.

УДК 691.175.2

DOI 10.52684/2312-3702-2024-50-4-87-92

**ВЫБОР ПЛАСТИФИКАТОРА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭТИЛЕНВИНИЛАЦЕТАТА**

*А. Н. Волоцкой, В. В. Авдонин*

**Волоцкой Алексей Николаевич**, старший преподаватель кафедры строительных конструкций и машин, Вятский государственный университет, г. Киров, Российская Федерация ; e-mail: alexeyqwerty@mail.ru;

**Авдонин Валерий Викторович**, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева, г. Саранск, Российская Федерация ; e-mail: avdoninvalerii@bk.ru

Научная статья посвящена прогнозированию динамических свойств вибропоглощающих полимерных композиционных материалов. Выполнен анализ влияния полярных и слабополярных пластификаторов на вибропоглощающие характеристики этиленвинилацетата. Показано, что полярность структурообразующих компонентов полимерного композиционного материала оказывает значительное влияние на его динамические свойства. Для изучения динамических характеристик (тангенс угла механических потерь  $\text{tg}\delta$ , динамический модуль упругости  $E'$ ) вибропоглощающих полимерных композиционных материалов применялся современный метод динамического механического анализа, позволяющий получить информацию об изменении данных характеристик в широком диапазоне температур. Результаты исследования могут быть использованы для разработки принципов проектирования составов вибропоглощающих полимерных материалов.

**Ключевые слова:** вибропоглощение, этиленвинилацетат, тангенс угла механических потерь, пластификатор, полярность, хлорпарафин, индустриальное масло.

**SELECTION OF A PLASTICIZER FOR THE DEVELOPMENT OF DAMPING POLYMERIC MATERIALS BASED ON ETHYLENE-VINYL ACETATE**

*A. N. Volotskaya, V. V. Avdonin*

**Volotskoy Aleksey Nikolayevich**, Senior Lecturer of Building Structures and Machinery Department, Vyatka State University, Kirov, Russian Federation, e-mail: alexeyqwerty@mail.ru;

**Avdonin Valeriy Viktorovich**, Candidate of Technical Science, Associate Professor of Applied Mechanics Department, National Research Mordovian Ogarev State University, Saransk, Russian Federation ; e-mail: avdoninvalerii@bk.ru

The scientific article is devoted to forecasting the dynamic properties of damping polymer composite materials. The effect of polar and weakly polar plasticizers on the damping characteristics of ethylene-vinyl acetate is analyzed. It is shown that the polarity of the structure-forming components of the polymer composite material has a significant effect on its dynamic properties. To study the dynamic characteristics (the mechanical loss tangent  $\text{tg}\delta$ , the dynamic modulus of elasticity  $E'$ ) of damping polymer composite materials, a modern method of dynamic mechanical analysis was used, which allows obtaining information on changes in these characteristics in a wide range of temperatures. The results of the study can be used to develop principles for designing damping polymer material compositions.

**Keywords:** damping, ethylene-vinyl acetate, mechanical loss tangent, plasticizer, polarity, chlorinated paraffin wax, industrial oil.

**Введение**

В настоящее время проблемы вибрации и шума являются преобладающими в инженерных системах и влияют на здоровье людей [1–4]. В связи с этим снижение вибрационной нагрузки является актуальной проблемой в строительстве. Существует множество материалов, способных преобразовывать механическую энергию колебаний в тепловую. Наиболее эффективными среди них являются полимерные композиционные материалы, обладающие высокими динамическими свойствами в широком спектре температур и частот [5–8]. Это обусловлено структурой полимера и его уникальными вязкоупругими свойствами. При изготовлении вибропоглощающих полимерных материалов большое внимание уделяют вопросам структурообразующих компонентов [9–13]. Совместимость данных компонентов с полимерной основой будущего материала оказывает огромное влияние на его эксплуатационные характеристики. В настоящее время мировым сообществом многие исследования динамических характеристик вибропоглощающих полимерных композиционных материалов проводятся на наполненных и модифицированных композитах, что затрудняет оценить вклад каждого структурообразующего компонента на ключевые свойства будущего материала [8, 14–16]. Для разработки вибропоглощающих материалов с высоким уровнем динамических свойств необходимо последовательно изучать и анализировать влияние каждого структурообразующего компонента на полимерную основу, что в

свою очередь приведет к оптимизации состава композита.

Одним из важнейших компонентов вибропоглощающего полимерного материала (ВПМ) является пластификатор, позволяющий улучшить условия обработки полимерной основы, а иногда и повысить значения ее некоторых характеристик [16–21]. Эффективность пластификатора зависит от его типа и концентрации.

Целью исследования является установление типа пластификатора, который будет совместим с полимерной основой (этиленвинилацетатом) и позволит улучшить обрабатываемость компонентов при смешении, а также увеличить демпфирующую способность полимера.

*Задачи исследования*

1) исследовать влияние двух пластификаторов разной полярности (хлорпарафин, индустриальное масло) на динамические свойства этиленвинилацетата (ЭВА).

2) оценить однородность пластифицированных смесей при помощи сканирующей электронной микроскопии.

3) определить степень набухания ЭВА в пластификаторах.

*Метод*

В настоящей работе в качестве полимерного связующего применялся этиленвинилацетат (содержание винилацетата 28%). Хлорпарафин ХП-470 (ХП) и индустриальное масло И-40 (МИ) использовались в качестве пластификатора. Мел использовался в качестве наполнителя при регистрации ИК спектров полимерных смесей.

Маркировка полимерных смесей и их составы приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Полимерные смеси**

Марка смеси	Полимер		Пластификатор	
	ЭВА		МИ	ХП
	Процентное содержание по объему			
ЭВА	100		-	-
ЭВА/МИ 80/20	80		20	-
ЭВА/МИ 60/40	60		40	-
ЭВА/ХП 80/20	80		-	20
ЭВА/ХП 60/40	60		-	40

Для изготовления полимерного материала применялся микросмеситель типа «Brabender». Температура смешивания компонентов – 120 °С при числе оборотов 44 об/мин.

Эффективность вибропоглощения полимерных материалов определяется следующими динамическими характеристиками:

1) динамический модуль упругости  $E'$ :

$$E' = \frac{N \cdot L \cdot \cos \delta}{t \cdot b \cdot \Delta L}, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где  $N$  – продольная сила, Н;  $L$  – длина образца между зажимами, мм;  $\delta$  – фазовый угол, °;  $t$  – толщина образца, мм;  $b$  – ширина образца, мм;  $\Delta L$  – изменение длины, мм.

2) динамический модуль механических потерь  $E''$ :

$$E'' = \frac{N \cdot L \cdot \sin \delta}{t \cdot b \cdot \Delta L}, \text{ МПа}; \quad (2)$$

3) тангенс угла механических потерь  $\text{tg} \delta$ :

$$\text{tg} \delta = \frac{E''}{E'} \quad (3)$$

Данные характеристики определяли путем проведения динамического механического анализа (ДМА).

Динамические испытания выполнялись при помощи анализатора Netzsch DMA 242 С.

Вибропоглощающие характеристики полимерных смесей определяли в температурном интервале от  $-80$  до  $+40$  °С при частоте 1 Гц.

ДМА проводился в соответствии со стандартом ASTM D4065-12 «Стандартная методика для пластмасс: динамико-механические свойства: определение и отчет о процедурах».

Для регистрации инфракрасных (ИК) спектров поглощения применялся ИК Фурье-спектрометр.

#### Результаты и обсуждение

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) показала относительную однородность

составов на всех концентрациях пластификатора, независимо от его типа (рис. 1–4).

Динамические характеристики ЭВА пластифицированного хлорпарафином и промышленным маслом представлены на рисунках 5, 6. Откуда видно, что все пластификаторы закономерно снижают температуру стеклования этиленвинилацетата. При повышении концентрации пластификатора до 40 % по объему тенденция к снижению температуры стеклования ЭВА сохраняется. Наименьшие значения  $T_c$  имеют полимерные смеси, пластифицированные хлорпарафином (рис. 5).

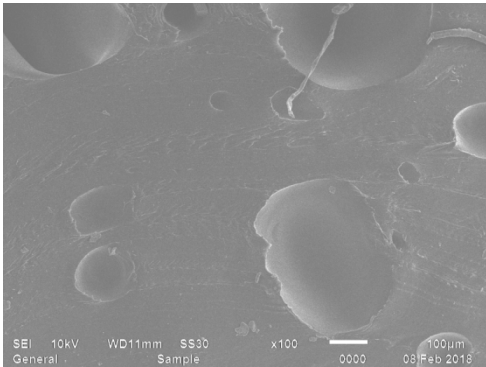


Рис. 1. СЭМ бинарной смеси ЭВА/МИ (80/20)

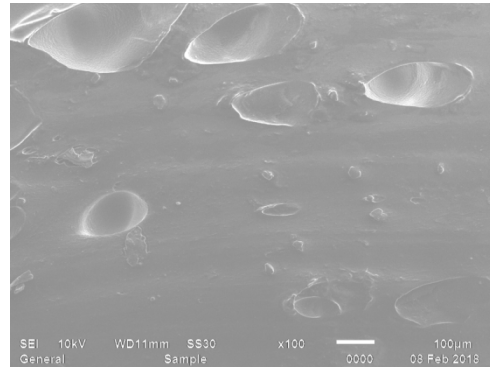


Рис. 2. СЭМ бинарной смеси ЭВА/МИ (60/40)

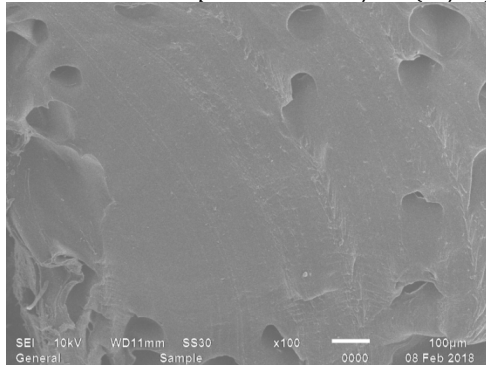


Рис. 3. СЭМ бинарной смеси ЭВА/XP (80/20)

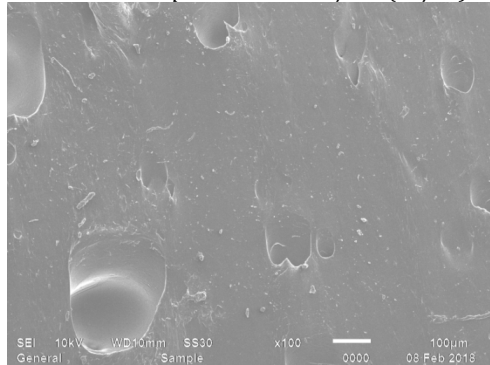
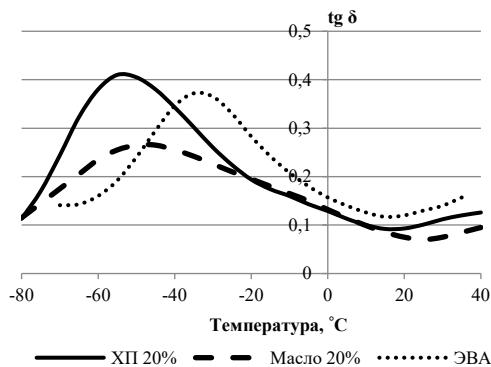
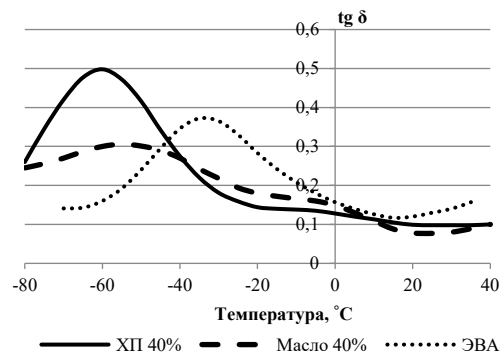


Рис. 4. СЭМ бинарной смеси ЭВА/XP (60/40)



а



б

Рис. 5. Тангенс угла механических потерь ( $tg\delta$ ) ЭВА:  
а – содержание пластификатора 20 %; б – содержание пластификатора 40 %

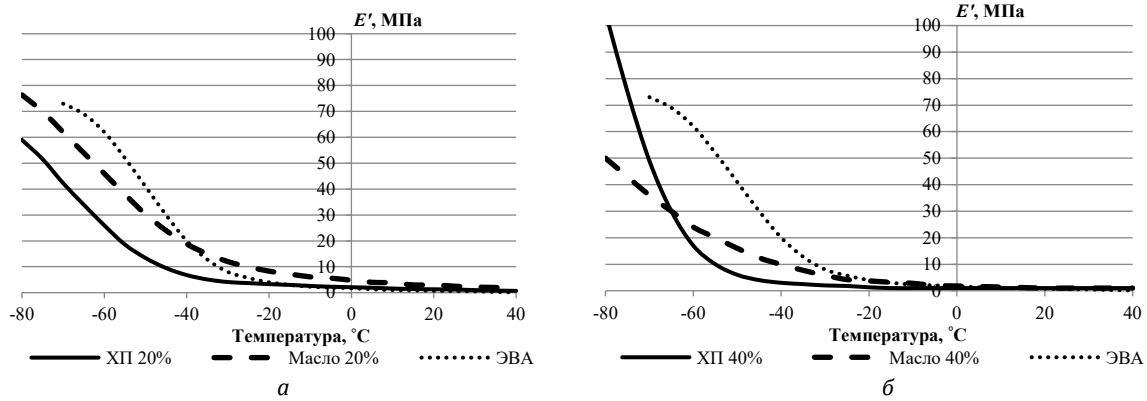


Рис. 6. Динамический модуль упругости ( $E'$ ) ЭВА:  
 а – содержание пластификатора 20 %; б – содержание пластификатора 40 %

Индустриальное масло в отличие хлорпарафина является слабополярным пластификатором согласно параметру растворимости и поэтому хуже совмещается полярным этиленвинилацетатом. Модели взаимодействия полярных и слабополярных пластификаторов с полимерной основой представлены на рисунке 7.

При пластификации ЭВА хлорпарафином интенсивность межмолекулярных цепных взаимодействий полимера снижается сильнее, чем индустриальным маслом, поскольку каждая молекула полярного пластификатора блокирует одну полярную группу этиленвинилацетата (рис. 7) [22].



Рис. 7. Схематическое изображение взаимодействия ЭВА с:  
 а – полярным и б – слабополярным пластификаторами

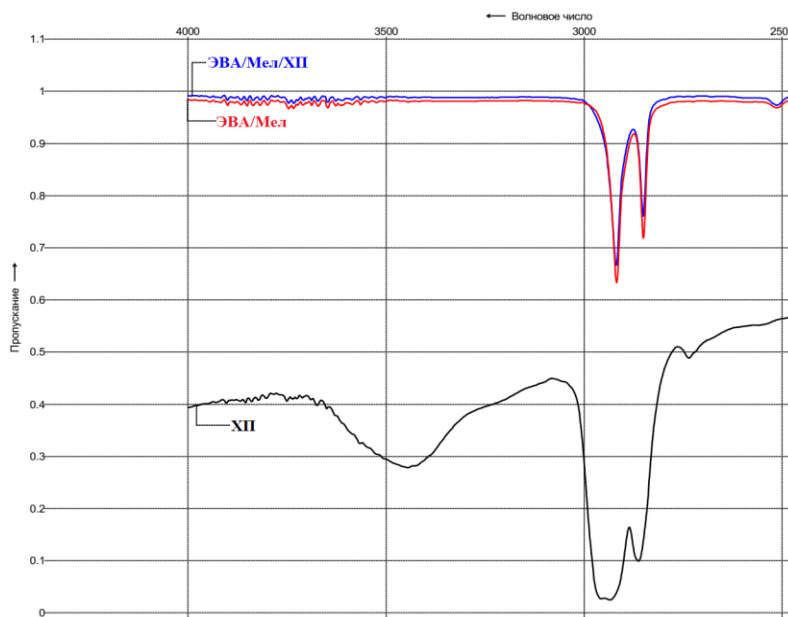


Рис. 8. Инфракрасная спектроскопия: ЭВА/мел/ХП

Использование индустриального масла в качестве пластификатора для ЭВА вызывает снижение тангенса угла механических потерь полимера. Однако при пластификации этиленвинилацетата хлорпарафином (ХП)  $\text{tg}\delta$  возрастает. Это обусловлено более интенсивным физическим взаимодействием «полимер – пластификатор». Химических связей согласно инфракрасной спектроскопии между ЭВА и ХП не обнаружено (рис. 8).

Введение пластификатора приводит к уменьшению динамического модуля упругости этиленвинилацетата (рис. 6). Хлорпарафин эффективнее снижает  $E'$  ЭВА по сравнению с индустриальным маслом.

Одним из условий при выборе пластификатора является отсутствие его миграции на поверхности полимерной смеси. На основании данного требования установлено, что введение индустриального масла в количестве до 20 % по объему включительно не приводит к миграции пластификатора. Однако дальнейшее увеличение его концентрации до 40 % приводит к ярко выраженной миграции. При введении хлорпарафина до 40 % по объему включительно миграции пластификатора на поверхности бинарной системы не выявлено.

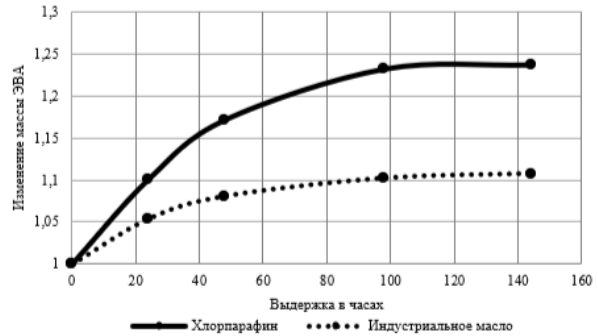


Рис. 9. Степень набухания ЭВА в пластификаторах

На рисунке 9 представлен график степени набухания этиленвинилацетата в пластификаторах. Откуда видно, что ЭВА, пластифицированный индустриальным маслом, имеет низкую степень набухания по сравнению с полимерной смесью ЭВА/ХП. Эти данные хорошо согласуются с результатами исследования динамических свойств полимерных смесей на основе этиленвинилацетата, представленными на рисунках 5, 6. Таким образом, можно сделать вывод, что индустриальное масло хуже снижает межмолекулярные силы сцепления в ЭВА по сравнению с хлорпарафином. Кроме того, у индустриального масла коэффициент поверхностного натяжения меньше, чем у хлорпарафина (табл. 2).

Таблица 2

**Коэффициент поверхностного натяжения пластификаторов**

Пластификатор	Коэффициент поверхностного натяжения*, мДЖ/м <sup>2</sup>
Индустриальное масло И-40	36,4
Хлорпарафин ХП-470	43,23

Примечание: \* – измерен методом отрыва капель.

**Заключение**

В результате проведенного исследования установлено, что хлорпарафин марки ХП-470 содержанием 40 % по объему является наиболее подходящим пластификатором для разработки вибропоглощающих полимерных композиционных материалов на основе этиленвинилацетата, так он оказывает положительный эффект на динамические

свойства ЭВА, улучшает условия обработки полимера, а кроме того, снижает его горючесть.

Индустриальное масло является ограниченно применимым пластификатором для этиленвинилацетата.

Установленные закономерности могут быть использованы для формирования принципов проектирования составов вибропоглощающих полимерных материалов.

**Список литературы**

1. Lakes R. S. Extreme damping in composite materials with negative-stiffness inclusions / R. S. Lakes, T. Lee, A. Bersie, Y. Wang // Nature. – 2001. – Vol. 86, № 13. – P. 565–567.
2. Adams J. D. Harnessing the damping properties of materials for high-speed atomic force microscopy / J. D. Adams, B. W. Erickson, J. Grossenbacher, J. Brugger, A. Nievergelt, G. E. Fantner // Nature Nanotechnology. – 2016. – Vol. 11 (2). – Режим доступа: <https://www.nature.com/articles/nnano.2015.254>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
3. Eichler A. Nonlinear damping in mechanical resonators made from carbon nanotubes and graphene / A. Eichler, J. Moser, J. Chaste, M. Zdrojek, I. Wilson-Rae, A. Bachtold // Nature Nanotechnology. – 2011. – Vol. 6. – P. 339–342.
4. Xu K. Towards a stable and high-performance hindered phenol/polymer-based damping material through structure optimization and damping mechanism revelation / K. Xu, Q. Hu, J. Wang, H. Zhou, J. Chen // Polymers. – 2019. – Vol. 11 (5). – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2073-4360/11/5/884>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
5. Черкасов В. Д. Битумно-каучуковое вяжущее для эффективных вибропоглощающих покрытий / В. Д. Черкасов, Ю. В. Юркин, В. В. Авдониин // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 8 (43). – С. 7–13.
6. Черкасов В. Д. Влияние полярности наполнителя на динамические свойства вибропоглощающих полимерных композиционных материалов на основе этиленвинилацетата / В. Д. Черкасов, А. Н. Волоцкой, Ю. В. Юркин, В. В. Авдониин // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 1 (42). – С. 52–62.





7. Cherkasov V. Prediction of radiation shielding properties of self adhesive elastic coating / V. Cherkasov, V. Avdonin, Yu. Yurkin, D. Suntsov // Materials physics and mechanics. – 2019. – Vol. 42, № 6. – P. 825–836.
8. He X. Z. Damping properties of ethylene-vinyl acetate rubber/polylactic acid blends / X. Z. He, M. Qu, X. Y. Shi // Journal of Materials Science and Chemical Engineering. – 2016. – Vol. 4, № 3. – P. 15–22.
9. Адоньева А. А. Взаимосвязь качественных показателей пластификаторов и свойств полимерно-битумных вяжущих / А. А. Адоньева, П. А. Лукьянец, Н. А. Лушников, А. С. Покатаев, Н. И. Савенкова, В. Е. Николаевский, Д. Ю. Небратенко // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – № 3 (41). – С. 51–56.
10. Адоньева А. А. Методика оценки агрегатного состояния после промораживания пластификаторов для полимерно-битумных вяжущих / А. А. Адоньева, И. А. Ефремов, А. С. Покатаев, Н. И. Савенкова, Д. Ю. Небратенко // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – № 1 (39). – С. 41–47.
11. Bolgar M. Handbook for the chemical analysis of plastic and polymer additives / M. Bolgar, J. Hubball, J. Groeger, S. Meronek. – CRC Press, 2008. – 481 p.
12. Murphy J. Additives for plastics handbook / J. Murphy. – Elsevier Science, 2001. – 484 p.
13. Landel R. Mechanical Properties of Polymers and Composites / R. Landel, L. Nielsen. – CRC Press, 1993. – 580 p.
14. Khonakdar H. A. Dynamic mechanical properties and morphology of polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer blends / H. A. Khonakdar, U. Wagenknecht, S. H. Jafari, R. Hassler, H. Eslami // Advances in Polymer Technology. – 2004. – Vol. 23, № 4. – P. 307–315.
15. Ljungberg N. The effects of plasticizers on the dynamic mechanical and thermal properties of poly (lactic acid) / N. Ljungberg, B. Wessle'n // Journal of Applied Polymer Science. – 2002. – Vol. 86, № 5. – P. 1227–1234.
16. Varughese S. Effect of plasticizer type and concentration on the dynamic mechanical properties of epoxidized natural rubber vulcanizates / S. Varughese, D. K. Tripathy // Journal of Elastomers and Plastics. – 1993. – Vol. 25, № 4. – P. 343–357.
17. Wypych A. Databook of plasticizers / A. Wypych. – ChemTec Publishing, 2017. – 696 p.
18. Wypych G. Handbook of plasticizers / G. Wypych. – ChemTec Publishing, 2004. – 693 p.
19. Wang Z. Plasticization effect of transgenic soybean oil. I. on ethylene propylene diene monomer (EPDM), as substitute for paraffin oil / Z. Wang, Y. Han, X. Zhang, Z. Huang, L. Zhang // Journal of Applied Polymer Science. – 2013. – Vol. 130, № 6. – P. 4457–4463.
20. Li X. The effect of paraffinic oil and aromatic oil on the crosslinks and physical properties of butyl rubber / X. Li, S. Tan, G. Liu, M. Hoch, S. Zhao // Journal of Macromolecular Science. – 2016. – Vol. 55, № 5. – P. 494–502.
21. Alekseev A. A. Plastification of styrene-butadiene block copolymer by radial structure with industrial oils / A. A. Alekseev, T. V. Petuhova, V. S. Osipchik, E. A. Kirichenko // Chemistry and Chemical Technology. – 2009. – Vol. 52, № 6. – P. 99–102.
22. Черкасов В. Д. Влияние модифицирующих добавок на динамические свойства полимерных материалов на основе этиленвинилацетата / В. Д. Черкасов, В. В. Авдонин, А. Н. Волоцкой, Ю. В. Юркин, И. А. Мансурова // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 4 (37). – С. 20–29.

© А. Н. Волоцкой, В. В. Авдонин

#### Ссылка для цитирования:

Волоцкой А. Н., Авдонин В. В. Вибропоглощающие полимерные материалы на основе этиленвинилацетата: выбор пластификатора // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2024. № 4 (50). С. 87–92.

УДК 539.3

DOI 10.52684/2312-3702-2024-50-4-92-96

## УРАВНЕНИЯ МЕЖДУ ДЕФОРМАЦИЯМИ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ УПРУГОГО ТЕЛА ТРЕМЯ ВЗАИМНО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫМИ ПЛАСТИНАМИ

О. В. Мкртычев

**Мкртычев Олег Витальевич**, кандидат физико-математических наук, ответственный секретарь периодического сетевого научного издания «Вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. Серия: Механика и математика», г. Новороссийск, Российская Федерация ; e-mail: oleg214@ya.ru

В этой статье описывается работа над известными уравнениями Коши в линейной теории упругости. Уравнения Коши связывают малые деформации с перемещениями элементарного параллелепипеда деформируемого однородного изотропного тела. Рассматриваются также известные уравнения из теории пластин. Рассматривая обе группы уравнений, автор работы при некоторых дополнительных условиях выводит более сложную форму уравнений Коши. В отличие от исходных уравнений, которые содержат только первые производные от перемещений, полученные – уже производные от перемещений первого, второго и третьего порядка. Это говорит о том, что представленное решение может приводить к более точным результатам при решении задач теории упругости. Однако это решение будет математически более сложным, ввиду большего порядка полученных дифференциальных уравнений.

**Ключевые слова:** уравнения Коши, деформации, перемещения, линейная теория упругости, нелинейная теория упругости, пластины, изгибные, мембранные слагаемые.