Вестник научно-технического развития
Bulletin of Science and Technical Development

Номер 175, 2024г.

DOI: 10.18411/vntr2024-175



Издается с 2007 года

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации Эл. № ФС77-29768.

ISSN 2070-6847

Журнал выпускается под научным руководством Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН

DOI: 10.18411/vntr2024-175

ОГЛАВЛЕНИЕ № 175, 2024

Данил Валерьевич Давыдов, Алексей Олегович Мальханов. Применение графовых нейронных сетей в задаче аппроксимации решения проблемы Ферми-Паста-Улама……..
……...**стр. 3 – 10**

Лидия Ивановна Куксенова, Екатерина Михайловна Кулешова, Сергей Андреевич Поляков. Оценка влияния наномодифицированных добавок на износостойкость материалов пар трения «сталь-медный сплав»…….**стр. 11 – 19**

Леонид Борисович Матусов. О расширении класса равномерно распределенных ЛП$_\tau$-последовательностей для расчета и векторной оптимизации параметров машин…**стр. 20 – 25**

Александр Анатольевич Шульженко, Михаил Борисович Модестов. Условия фиксации температурных изменений, вызванных потовыделением человека при тепловом воздействии……..……**стр. 26 – 32**

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации Эл. № ФС77-29768.



ISSN 2070-6847

DOI: 10.18411/vntr2024-175-1

УДК 004.032.26

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФОВЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧЕ АППРОКСИМАЦИИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ФЕРМИ-ПАСТА-УЛАМА

© Данил Валерьевич Давыдов, Алексей Олегович Мальханов
Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова–Грехова Российской академии наук», Нижний Новгород, Россия
davidoffdan27@yandex.ru, alexey.malkhanov@gmail.com

Аннотация. *В данной работе исследуется применимость графовых нейронных сетей к задачам аппроксимации решения проблемы Ферми-Паста-Улама (ФПУ). Основное внимание уделено методам восстановления энергии мод колебаний с помощью графовых нейронных сетей и её сравнению с энергией, вычисленной с помощью традиционных численных методов.*
Ключевые слова: *проблема Ферми-Паста-Улама, графовые нейронные сети, глубокое обучение.*

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Грант РНФ № 20-19-00613).

APPLICATION OF GRAPH NEURAL NETWORKS TO APPROXIMATE THE SOLUTION OF THE FERMI-PASTA-ULAM PROBLEM

© D.V. Davydov, A.O. Malkhanov
Mechanical Engineering Research Institute of the RAS – Branch of "Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences", Nizhny Novgorod, Russian Federation
davidoffdan27@yandex.ru, alexey.malkhanov@gmail.com

Abstract. *In the paper, there is investigated the applicability of graph neural networks to the problems of approximating the solution of the Fermi-Pasta-Ulam (FPU) problem. The main attention is paid to the methods of reconstructing the energy of oscillation modes with the help of graph neural networks and its comparison with the energy calculated with traditional numerical methods.*
Keywords: *Fermi-Pasta-Ulam problem, graph neural networks, deep learning.*

Acknowledgements. *The work was supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 20-19-00613).*

Введение. Возникновение направления в машинном обучении, посвященном решению научных задач, открыло новую область в методах моделирования физических проблем на стыке аналитической постановки задачи и моделирования на основе данных. В последние годы широкое распространение получили физико-информированные нейронные сети (PINN) [1, 2], различные нейронные операторы, наиболее известный среди них оператор Фурье (FNO) [3], а также разнообразные графовые нейронные сети (GNN) [4]. Все эти алгоритмы способны работать с относительно небольшим объемом данных, что выгодно отличает их от других методов анализа.

В данной работе исследуется применимость графовых нейронных сетей к задачам аппроксимации решения проблемы Ферми-Паста-Улама (ФПУ) [5]. Работа посвящена методам восстановления энергии мод колебаний с помощью графовых нейронных сетей и её сравнение с энергией, полученной с помощью традиционных численных методов.

О проблеме (парадоксе) Ферми-Паста-Улама. В 1953 году сотрудники национальной лаборатории в Лос-Аламосе обратили внимание на простейшую, первый взгляд, одномерную систему – цепочку грузиков, соединенных пружинами с нелинейной упругостью. Результаты моделирования, с одной стороны, были вполне ожидаемыми: после возбуждения основного колебательного режима систему предоставляли самой себе, после чего энергия равномерно распределялась по остальным колебательным модам, и движения цепочки обретали характер белого шума. Но запустив моделирование системы в очередной раз, исследователи получили неожиданный результат – система вышла из состояния равновесия, энергия в процессе эволюции периодично переходила между наиболее длинноволновыми модами, практически не передаваясь на коротковолновые колебания, более того система возвратилась в исходное состояние. Система уравнений, описывающая динамику такой модели, имеет вид:

$$\ddot{y}_n = y_{n+1} + y_{n-1} - 2y_n + \alpha[(y_{n+1} - y_n)^2 - (y_n - y_{n-1})^2] + \beta[(y_{n+1} - y_n)^3 - (y_n - y_{n-1})^3] \quad (1)$$

где y_n – смещение $n-$го грузика, α, β – параметры нелинейности (нелинейной упругости). Замена переменных

$$y_n(t) = \sqrt{\frac{2}{N+2}} \sum_{k=1}^{N} Q_k(t) \sin\left(\frac{\pi k n}{N+1}\right), \quad (2)$$

приводит к N новым переменным $Q_k(t)$, являющимся нормальными модами линейной системы. Частоты нормальных мод:

$$\omega_k = 2 \sin \frac{\pi k}{2(N+1)}. \quad (3)$$

$$E_k = \frac{1}{2}\left(\dot{Q}_k^2 + \omega_k^2 Q_k^2\right). \quad (4)$$

В отсутствии нелинейности энергия (4) каждого из -осцилляторов является интегралом движения. В слабо нелинейном случае эти моды взаимодействуют между собой и их энергии E_k начинают завесить от времени.
Гамильтониан цепочки нелинейных осцилляторов имеет вид:

$$H = \sum_{i=0}^{N} (\frac{1}{2} p_i^2 + V(y_{i+1} - y_i)), \quad (5)$$

где y_i и p_i – смещение и импульс $i-$ го грузика, $V(y) = \frac{y^2}{2} + \frac{\alpha y^3}{3} + \frac{\beta y^4}{4}$ – нелинейный потенциал взаимодействия.
В настоящее время данный феномен широко известен как парадокс Ферми-Паста-Улама (ФПУ) [5]. По-видимому, авторами ожидалось, что любая нелинейность приведет к равнораспределению по энергии между всеми модами колебаний. Такие ожидания были связаны с аналогиями из статистической механики, которая требует релаксации системы к состоянию термодинамического равновесия.
Дискретная модель нелинейной струны только с квадратичной нелинейностью имеет следующий вид:

$$\ddot{y}_n = y_{n+1} + y_{n-1} - 2y_n + \alpha[(y_{n+1} - y_n)^2 - (y_n - y_{n-1})^2], \quad n = 0, 1, \dots N, \quad (6)$$

Данную дискретную систему принято называть $\alpha-$ ФПУ. Так же широко исследуется система $\beta-$ ФПУ, дискретная модель нелинейной струны только с кубической нелинейностью:

$$\ddot{y}_n = y_{n+1} + y_{n-1} - 2y_n + \beta[(y_{n+1} - y_n)^3 - (y_n - y_{n-1})^3], \quad n = 0, 1, \dots N, \quad (7)$$

Модель ФПУ можно представить, как цепочку одинаковых масс, связанных одинаковыми нелинейными пружинами. Такие цепочки очень полезны в изучении различных нелинейных волновых явлений [6]. Пружинки подчиняются закону Гука с небольшими нелинейными поправками. При $\alpha = \beta = 0$ движение в модах независимы. То есть система представляет собой ансамбль N невзаимодействующих осцилляторов. При наличии нелинейности между осцилляторами возникает взаимодействие.
В литературе было предложено два основных подхода к исследованию проблемы ФПУ. Первый подход заключается в анализе динамики системы с помощью предельного перехода [7]. Для этого необходимо постулировать локализацию энергии в пространстве мод, так как возбуждение высокочастотных мод означало бы невозможность непрерывной аппроксимации. Это послужило подспорьем к доказательству что систему $\alpha-$ ФПУ можно преобразовать в уравнение Уравнение Кортевега — де Фриза [7], а из системы $\beta-$ ФПУ можно получить одномерное уравнение Шредингера. Нелинейная природа этих уравнений, как широко известно, порождает солитоны.
Второй подход предполагает анализ зависимости динамики системы от величины энергии решения. Результаты в рамках этой парадигмы были получены Ф.М. Израилевым и Б.В.

Чириковым [8], которые ввели понятие порога стохастичности (или порога равнораспределения) и предложили первую оценку этого порога на основе критерия перекрытия нелинейных резонансов [9]. В данной работе этот подход не будет рассматриваться.
Проинтегрируем ФПУ систему при нулевых начальных условиях,

$$y_0 = y_N = 0. \quad (8)$$

Получаются решения, соответствующие стоячим волнам. При периодических начальных условиях,

$$y_0 = y_N, \quad (9)$$

получим решения, допускающие бегущие волны.

Графовые сверточные нейронные сети. Графовые сверточные нейронные сети (GCNN) являются обобщением сверточных нейронных сетей (CNN) для работы с графами [4]. Графовые сверточные нейронные сети способны извлекать многомасштабные пространственные характеристики посредством использования общих весовых параметров и локализованных фильтров. Графовые сверточные нейронные сети, в отличие от сверточных нейронных сетей, способны работать с неструктурированными данными, определив свертку основанную на структуре графа. Распространяя информацию локальное окружение каждого узла, определенное матрицей смежности, GCNN инвариантны по отношению к порядку, в котором узлы указаны в матрице признаков.
Главной отличительной чертой графовых сверточных нейронных сетей является использование алгоритма обмена сообщениями в нейронных сетях (Message Passing Neural Networks (MPNNs)) [10].
В данной работе мы будем использовать графовые сверточные сети предложенные в [4]. Данную модель будем обозначать GNN (Graph neural network).

Аппроксимация решений $\alpha -$ ФПУ системы с помощью графовой сверточной сети. Рассмотрим систему $\alpha -$ ФПУ для $N = 32$, с параметром нелинейности α и нулевыми граничными условиями [1]:

$$y_0 = y_{32} = 0. \quad (10)$$

На рис.1 представлено начальное состояние системы, задающиеся соотношением:

$$y_n = \sin\left(\frac{\pi n}{L}\right), \quad (11)$$

где $L = 32$, для $n = 0, 1, \dots, 32$.

С помощью метода Рунге-Кутты 4го порядка вычислим эволюцию системы, с шагом $dt = 0.2$ в интервале времени $t_min = 0$; $t_max = 20000$. С параметрами нелинейности α [0.2, … ,0.3] с шагом по $d\alpha$ = 0.005.

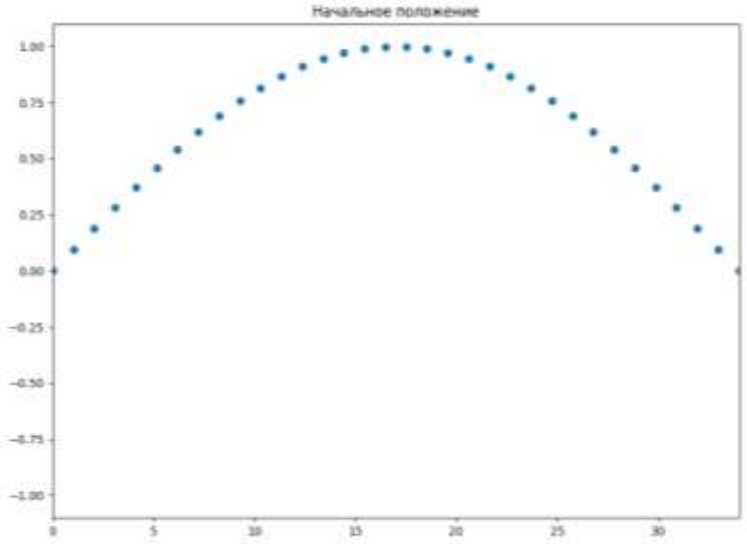


Рис.1. Начальное состояние системы.

Из численных решений получим распределение энергии для первых пяти мод с помощью (4).

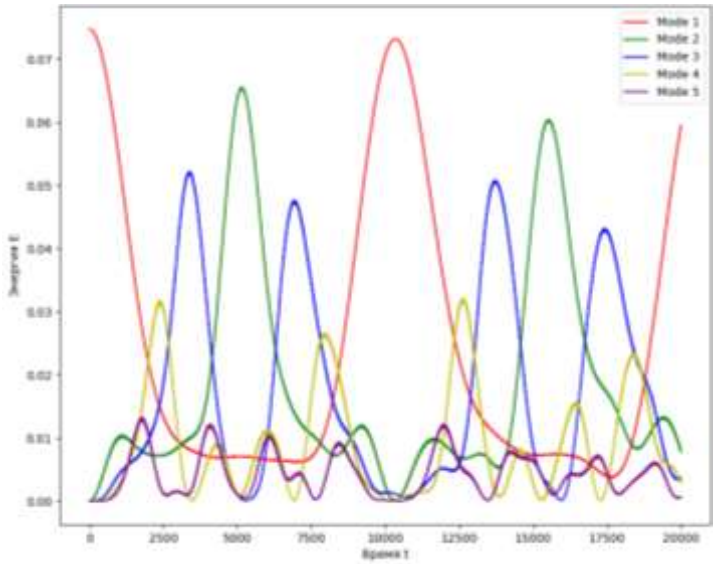


Рис.2. Энергия первых пяти мод для системы $\alpha -$ ФПУ (α=0.25).

Аппроксимируем данные решения графовой сверточной сетью, предложенной в [4]. Для этого сформируем граф, вершины которого задаются тремя величинами (Graph Embeddings):

1. Моментом времени t.
2. Номером массы n = 0, 1, …, N.
3. Параметром нелинейности α.

Каждой вершине графа поставим в соответствие значения $y_n(\alpha, t, n)$.

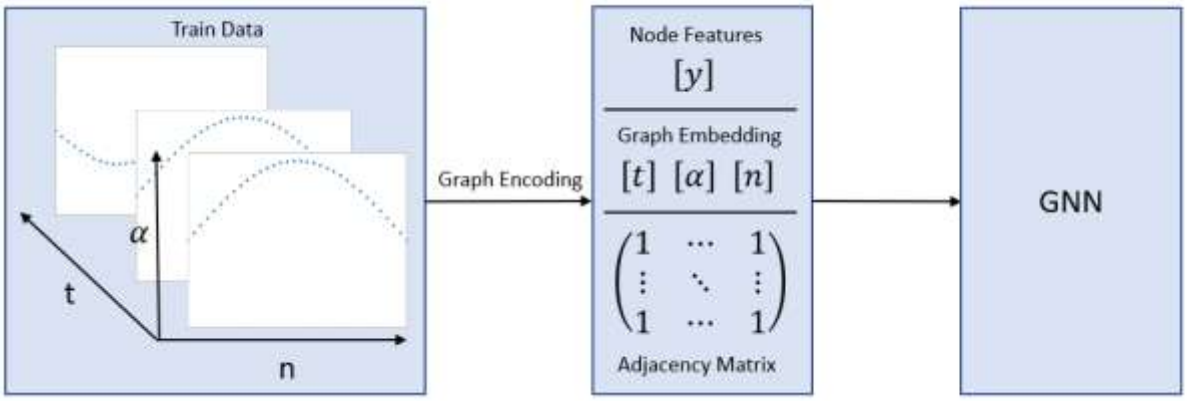


Рис.3. Информация о смещениях представляется в виде графа, где узлы определяются с помощью момента времени t, номером n и параметром нелинейности α. Ребра графа формируются методом radius graph [11].

После тренировки модели, получим энергию распределения первых пяти мод с помощью (4), из выходов модели $y_{nn_n}(\alpha, t)$, предсказанных для α = 0.25, входившую в тренировочную выборку.

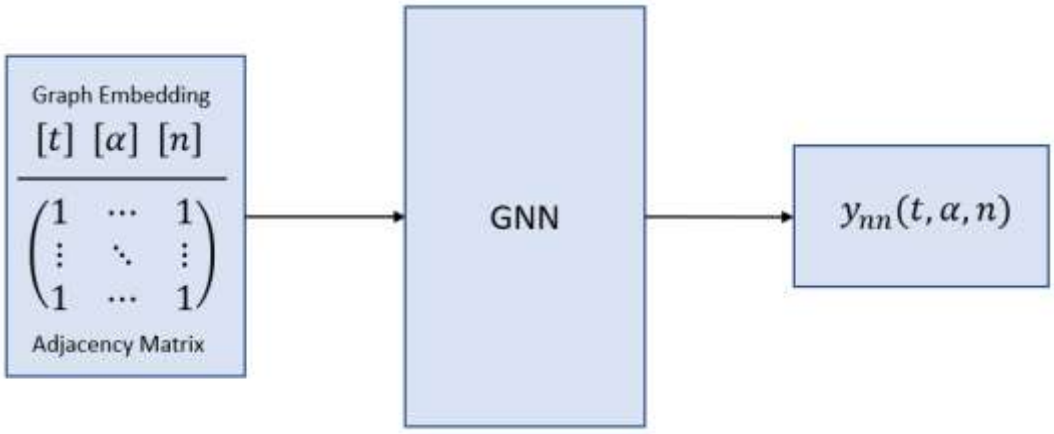


Рис. 4. Процесс получения выхода модели $y_{nn_n}(\alpha, t)$, соответствующий смещениям -го осциллятора, в момент времени t, с параметром нелинейности α.

Вычислим среднюю относительную ошибку MRE (Mean Relative Error) по формуле:

$$MRE_n = \frac{1}{N_{points}} \sum_{i=1}^{N_{points}} \frac{\left|(y_n^i(\alpha, t) - y_nn_n^i(\alpha, t)\right|}{\left|(y_n^i(\alpha, t)\right|}, \quad (12)$$

где $N_{points} = 100000$ – количество состояний, поданных на вход в модель, $y_n(\alpha, t)$ – эволюция смещения -го осциллятрора, полученной числено, $y_nn_n^i$ – выход модели, соответствующий смещению n-го осциллятрора.

Индекс n	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
MRE_n	0.00026	0.00014	0.00013	0.00011	0.00015

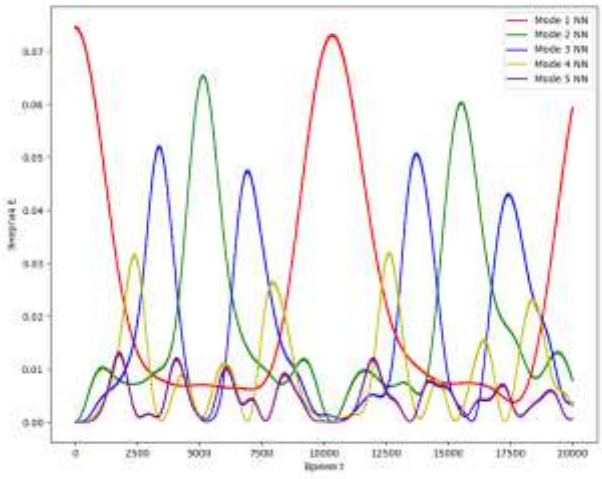


Рис. 5. Энергия первых пяти мод полученных графовой нейронной сетью (α = 0.25).

Теперь получим энергию распределения первых пяти мод, предсказанных моделью для $\alpha = 0.2503$, не входившую в тренировочную выборку. Для сравнения с помощью метода Рунге-Кутты 4 порядка вычислим эволюцию системы, а также энергию первых пяти мод для $\alpha = 0.2503$.

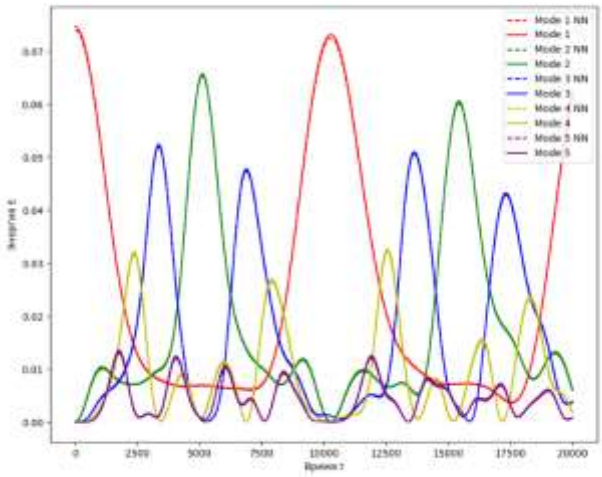


Рис. 6. Сравнение энергии первых пяти мод полученных графовой нейронной сетью (пунктирные линии) для $\alpha = 0.2503$ и энергия первых пяти мод полученных числено (сплошные линии) для $\alpha = 0.2503$.

Вычислим относительную MRE_n по формуле (12) для $n = \overline{1,5}$.

Индекс n	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
MRE_n	0.00037	0.00011	0.00021	0.00014	0.00016

Список литературы

1. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E. Physics informed deep learning (Part I): Data-driven solutions of nonlinear partial differential equations, https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.10561, 2017
2. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computational Physics. - 2018. - Vol. 378. Article ID: 686. https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045
3. Li Z., Kovachki N., Azizzadenesheli K., Liu B., Bhattacharya K., Stuart A., Anandkumar A. Fourier neural operator for parametric partial differential equation, https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.08895 , 2020.
4. Ogoke F., Meidani K., Hashemi A., Farimani A.B. Graph convolutional networks applied to unstructured flow field data // Machine Learning: Science and Technology. - 2021. - Vol. 2, No 4. Article ID: 045020. https://doi.org/10.1088/2632-2153%2Fac1fc9
5. Fermi E., Pasta J., Ulamm S. Studies of non linear problems. Los Alamos Scientific Report LA-1940, (May 1955) // Collected Papers of Enrico Fermi, vol. 2. Copyright 1965. The University of Chicago Press. P.977–988.
6. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. - М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. - 160 с.
7. Zabusky N.J., Kruskal M.D. Interaction of "solitons" in a collisionless plasma and the recurrence of initial states // Physical Review Letters. - 1965. - Vol. 15, No 6. - P. 240–243. https://doi.org/10.1103/PhesRevLett.15.240
8. Израйлев Ф.М., Чириков Б.В. Статистические свойства нелинейной струны // Препринт Института ядерной физики СО АН СССР. – Новосибирск: 1965. - 26 с.
9. Чириков Б.В. Резонансные процессы в магнитных ловушках // Атомная энергия. - 1959. - Т. 6, № 6. - С. 630–638.
10. Gilmer J., Schoenholz S., Riley P.F., Vinyals O., Dahl G.E. Neural message passing for quantum chemistry // Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning, Sydney, Australia, PMLR 70, 2017. https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.01212
11. https://pytorch-geometric.readthedocs.io/en/latest/generated/torch_geometric.nn.pool.radius_graph.html

Дата поступления: 29 октября 2024 г.

DOI: 10.18411/vntr2024-175-2

УДК621.891

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ДОБАВОК НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ПАР ТРЕНИЯ «СТАЛЬ-МЕДНЫЙ СПЛАВ»

[1] Лидия Ивановна Куксенова[1], Екатерина Михайловна Кулешова[2], Сергей Андреевич Поляков[2,1]

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

[2]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

lkukc@mail.ru, kuleshova.em@mail.ru, serpol50z@rambler.ru

***Аннотация**: Описан механизм формирования износостойкости материалов пар трения «сталь-медный сплав» при использовании наномодифицированных смазочных сред на основе результатов триботехнических испытаний на машине трения АЕ-5 по схеме (диск-три пальца). Показана взаимосвязь между ростом эффективной пристеночной вязкости пленки и ростом концентрации мицелл, возникающем в результате роста нагрузки на сопряжение. Показано, что процесс пленкообразования позволяет расширить область допустимых контактных давлений для сопряжений скольжения сталь-медный сплав.*

***Ключевые слова:** сопряжение скольжения, наномодифицированные смазочные материалы, пленкообразование, износостойкость, червячные передачи.*

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF NANOMODIFIED ADDITIVES ON THE WEAR RESISTANCE OF MATERIALS OF FRICTION PAIRS "STEEL-COPPER ALLOY"

L.I. Kuksenova[1], E.M. Kuleshova[2], S.A. Polyakov[2]

[1]Federal State Budgetary Scientific Institution A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[2]N.E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

lkukc@mail.ru, kuleshova.em@mail.ru, serpol50z@rambler.ru

***Abstract.** The mechanism of wear resistance formation of materials of friction pairs "steel-copper alloy" using nanomodified lubricating media is described based on the results of tribological tests on the friction machine AE-5 according to the scheme (disk-three fingers). The relationship between the growth of the effective near-wall viscosity of the film and the growth of the concentration of micelles, which occurs as a result of the growth of the load on the conjugation, is shown. It is shown that the process of film formation allows to expand the range of permissible contact pressures for sliding conjugations steel-copper alloy.*

***Keywords:** sliding coupling, nanomodified lubricants, film formation, wear resistance, worm gears.*

Введение. Как показывает анализ литературных данных, одной из главных причин выхода из строя различных сопряжений скольжения является разрушение поверхностного слоя (изнашивание). Существуют различные подходы для повышения износостойкости материалов пар трения. Традиционные методы, такие как повышение твердости деталей, усовершенствование технологии изготовления и др., являются весьма дорогостоящими, и не дают значимого эффекта. В то же время, как показывает ряд исследований, смазочные материалы (СМ), в состав которых входят добавки солей жирных кислот, являются весьма эффективными для повышения КПД и нагрузочной способности некоторых тяжелонагруженных сопряжений скольжения [1, 2]. Расширение ассортимента конструкций, конструкционных материалов и способов обработки поверхности трения требует проведение трибологических испытаний и исследований, направленных на выбор состава добавок к смазочному материалу. При этом опыт триботехнических испытаний показывает, что взаимодействие солей жирных кислот с наноразмерными частицами (использование наномодифицированных добавок) может стать перспективным направлением в области повышения работоспособности различных пар трения [3]. Средством обоснования эффективности предлагаемых составов смазочных материалов служат результаты исследования механизма формирования износостойкости материалов сопряжений скольжения при использования подобных добавок к СМ. Это направление работ особо актуально для решения задачи повышения триботехнической эффективности материалов червячных передач.

Червячные передачи широко используются в машиностроении благодаря своей компактности, высокой кинематической точности, бесшумности и плавности работы, а также возможности получения самотормозящей передачи, позволяющей выполнить механизм без тормозного устройства, препятствующего обратному вращению колеса. Червячные передачи используются в тяжелонагруженных ответственных механизмах, например, таких как лифты и эскалаторы. Основной причиной выхода из строя большинства изделий машиностроения является изнашивание. Изнашивание зубьев червячного колеса происходит в связи с тем, что вектор скорости скольжения и касательная линии контакта на отдельных участках контактирования колеса с червяком составляют угол в несколько градусов, что неблагоприятно для формирования смазочной пленки, и способствует развитию процесса изнашивания [4].

Целью данной работы является анализ влияния наномодифицированных добавок к смазочному материалу на работоспособность сопряжений скольжения сталь-медный сплав для разработки рекомендаций по повышению срока службы червячных передач, что позволит расширить параметрические границы их применения за счет сформированной на поверхности трения вторичной пленки со структурой, обеспечивающей существенное улучшение динамических и адаптационных свойств червячной передачи.

Материалы и методики исследования. Для оценки влияния наномодифицированных добавок на различные параметры сопряжений скольжения были проведены триботехнические испытания на машине трения АЕ–5 по схеме диск – три пальца (диск – сталь, пальцы – латунь). Эта машина часто используется для исследования свойств антифрикционных материалов и сочетаний конструкционных и смазочных материалов, характерных для смазываемых опор скольжения. Испытания заключались в проведении приработки в режиме “на грани заедания” по ГОСТ 23.215–84 и проводились при использовании чистого индустриального масла, того же масла с добавкой нанодисперсной

суспензии серпентина (СС) и нанодисперсной суспензии серпентина с добавлением солей жирных кислот (СС + СЖК) (добавка «Стрибойл») [4]. Наномодифицированные смазочные материалы на основе нанодисперсной суспензии серпентина, в состав которой входят наноразмерные частицы (с размерами 50 –100 нм) были разработаны с использованием солей жирных кислот мягких металлов, образующих периферию мицелл с ядрами из наночастиц. Образующуюся на поверхностях трения пленку исследовали методами профилографирования по ГОСТ 23. 224-86, рентгеноструктурного анализа по методике [5] и стандартного микрозондового анализа.

Результаты и их обсуждение. Полученная зависимость коэффициента трения от контактного давления по результатам испытаний индустриального масла с нанодисперсной минеральной добавкой и солями жирных кислот приведена на рис. 1.

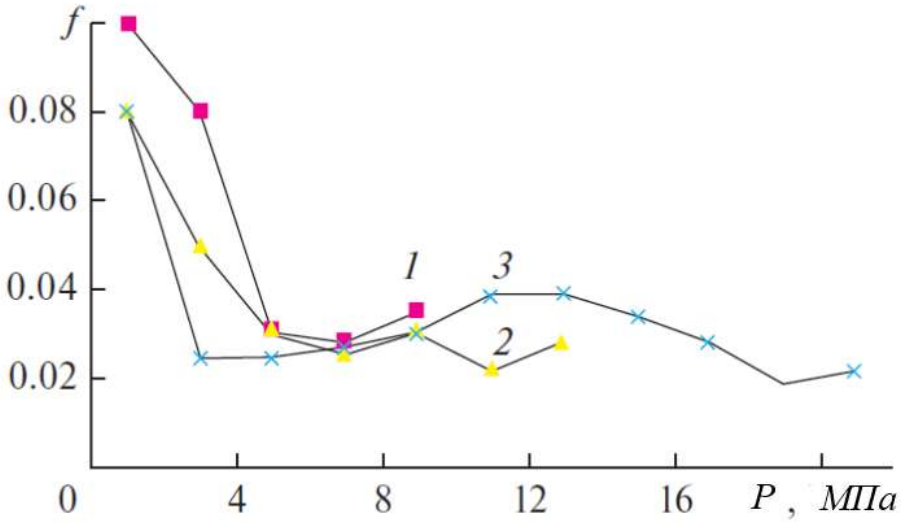


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от контактного давления при использовании различных СМ: №1 – И20А; №2 – И20+СС; №3 – И20А + СС + СЖК

Можно видеть, что на зависимостях коэффициента трения от контактного давления появляется так называемый “второй” минимум коэффициента трения. Этот минимум не соответствует минимуму коэффициента трения на диаграмме Герси-Штрибека, физический смысл которого состоит в переходе от гидродинамического режима смазывания к смешанному. Получаемый минимум является “вторым” по отношению к диаграмме Герси-Штрибека, т.к. он целиком находится в области граничной смазки. Необходимым условием для появления “второго минимума” является наличие наномодифицированных добавок в смазочном материале. В результате профилографирования была обнаружена интересная закономерность: происходило не уменьшение размера изнашиваемой детали, как это всегда наблюдается при испытаниях на износ, а наоборот – наращивание материала, то есть пленкообразование, рис.2.

Из рис. 2 видна цветовая разница поверхностей, указывающая на образование пленки на поверхности трения, что также подтверждается данными профилографирования стального образца, испытанного в среде с наномодифицированной добавкой, рис. 3.



а *б*

Рис.2. Микрофотография поверхности трения стального образца после трения, в смазочных материалах: *а* - чистого индустриального масла; *б* - индустриального масла с наномодифицированной добавкой.

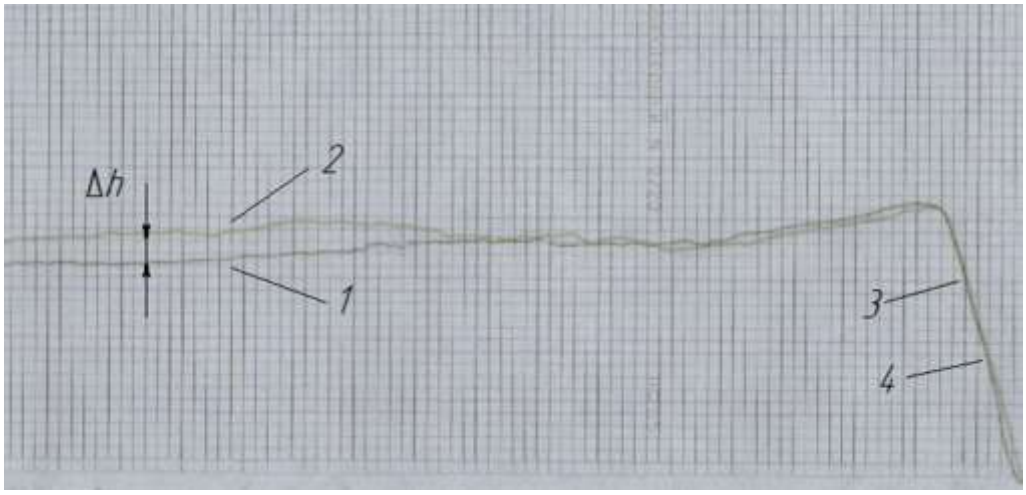


Рис. 3. Профилограммы поверхности стального образца: 1 — поверхность после проведения испытаний при давлении 5 МПа, 2 — поверхность после проведения испытаний при давлении 8,3 МПа, 3, 4 — метки на свободных от трения поверхностях образца, обеспечивающие воспроизводимость трассы профилографирования, Δ*h* – разница высот профиля до и после изнашивания (толщина изношенного слоя).

Анализ проводимости образующейся пленки, осуществленный с помощью сканирующего туннельного микроскопа, выявил высокую степень выглаживания поверхности трения. Кроме того, микрозондовый анализ химического состава приповерхностных слоев энерго-дисперсионным методом на электронном сканирующем микроскопе Genesis XM 4 System 30, укомплектованным Si детектором с ультратонким окном, показал, что в приповерхностных слоях латуни произошли существенные изменения состава, хорошо коррелирующие с данными рентгеноструктурного анализа [5] и данными, отраженными в [6]. Наиболее существенные изменения состоят в том, что легирующие элементы, содержащиеся в латуни, - цинк и алюминий, уходят из поверхностных слоев, что рентгеноструктурно выражается в заметном уменьшении периода решетки. Судя по тому, что плотность дислокаций по данным рентгеноструктурного анализа в приповерхностных слоях также уменьшается [5], в этих слоях происходит избирательное растворение и соответствующая ему релаксация

напряжений. Существенным изменением состава является также появление в приповерхностных слоях углерода и кислорода в достаточно больших количествах (до 12% углерода и до 3% кислорода – массовые проценты в пленке толщиной до 1 мкм). Заметим, что перед проведением микрозондового анализа образцы промывались бензином и ацетоном, что исключает возможность сохранения на поверхности адсорбированных молекул смазочного материала.

Таким образом, значительная доля в составе пленки принадлежит металлическим компонентам, которые являются продуктами избирательного растворения и, частично, изнашивания металлических материалов, входящих в поверхностный деформированный слой. Важно отметить, что в составе пленки появляется кремний, как основная составляющая часть наночастиц серпентина, образующих тиксотропную структуру пленки. Кроме того, значительная доля углерода и кислорода в пленке подтверждает высказанную ранее гипотезу о возможности полимеризации продуктов деструкции смазочного материала под воздействием солей жирных кислот и практически полностью перешедшего в смазочный материал алюминия. Отметим также, что аналогичные по составу деталей и смазочных материалов эксперименты проводились при возвратно – поступательном движении образцов на машине трения МТ-8 по методике ГОСТ 23. 224-86, где также профилографически фиксировалась остаточная пленка значительной толщины (от 100 нм и более, рис.3), которая существенно усиливает приработочные эффекты и несущую способность поверхности [7].

Есть основания полагать, что твердые наноразмерные частицы, содержащиеся в присадке к маслу, в процессе механического взаимодействия с поверхностями трения, повышают свою химическую активность (механохимический эффект), которая увеличивается по мере роста нагрузки на сопряжение. Рост химической активности наночастиц приводит к их взаимодействию с жирными кислотами, содержащимися в добавке, и поверхностями трения (т.е. к образованию мицелл). В процессе роста нагрузки и уменьшения зазора между этими поверхностями увеличивается концентрация мицелл в зазоре и интенсивность их взаимодействия с поверхностями трения. В результате данный коллоидный раствор формирует пленку, а интенсивность ее формирования будет увеличиваться по мере механоактивации наночастиц, т.е. с ростом нагрузки. Кроме того, увеличение концентрации мицелл в зазоре будет приводить к росту эффективной пристеночной вязкости, которую можно оценить по известным зависимостям.

Введение в дисперсионную среду с вязкостью η_0 твердых частиц дисперсной фазы (малой концентрации, т.е. в отсутствие их взаимодействия между собой) приводит за счет сил трения при сдвиге к дополнительному вращательному движению частиц и, следовательно, к диссипации энергии, в результате чего вязкость дисперсной системы η возрастает пропорционально объемной доле дисперсной фазы φ [6]

$$\eta = \eta_0(1 + k\varphi),$$

где η – вязкость дисперсной системы, η_0 – вязкость чистой дисперсионной среды; k – фактор формы частиц (для сферических 2,5), φ – объемная концентрация дисперсной фазы. Таким образом, в отсутствие взаимодействия частиц дисперсная система является ньютоновской жидкостью, но с повышенной по сравнению с дисперсионной средой вязкостью [6].

Очевидно, что рост эффективной пристеночной вязкости пленки приводит к росту толщины смазочной пленки. Таким образом, с ростом толщины смазочной пленки должно происходить снижение интенсивности изнашивания, аналогично снижению коэффициента трения как это происходит при гидродинамическом режиме смазки [8].

На рис. 4. показано перестроенное в виде диаграммы Герси – Штрибека изменение коэффициента трения при использовании упомянутых ранее СМ по результатам проведенных испытаний [9].

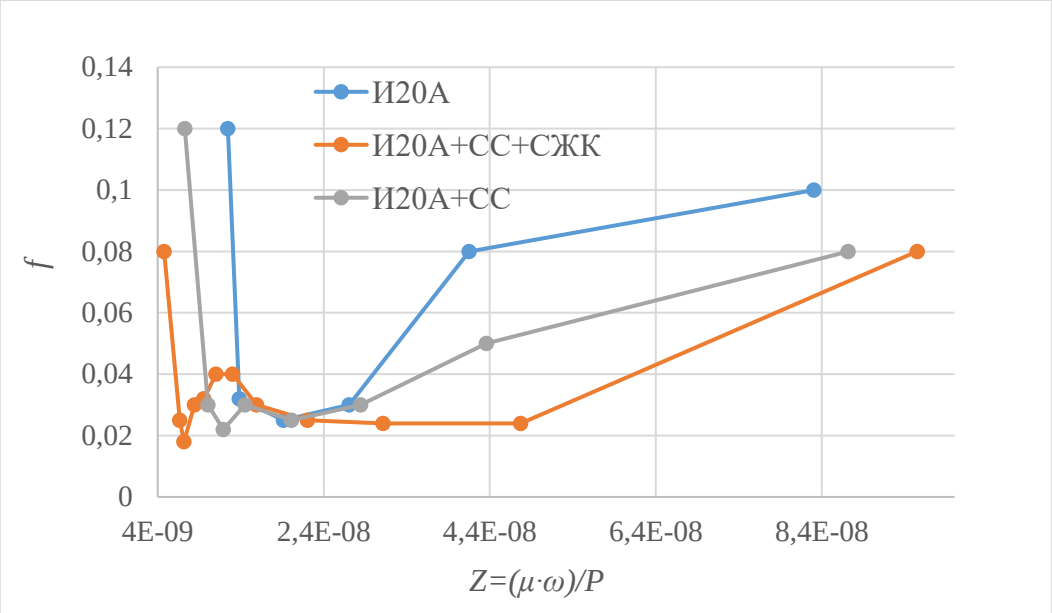


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от условной толщины смазочного слоя (Z, выраженный в условных единицах толщины) при использовании различных СМ: №1 – И20А; №2 – И20+СС; №3 – И20А + СС + СЖК

Из рис. 4. видно, что если для СМ №1 получается классическая форма диаграммы Герси – Штрибека, то добавление нанодисперсного компонента, особенно для СМ №3, четко формирует второй минимум коэффициента трения, который целиком находится в области граничной смазки. Для иллюстрации действия наномодифицированных смазочных материалов проводились испытания некоторых из них по описанной выше методике. Результаты испытаний на прирабатываемость по методике ГОСТ 23. 224-86 показаны в таблице 1.

Как показывают результаты испытаний, оптимизация режима приработки и подбор состава смазочного материала позволяют существенно повысить несущую способность рассматриваемого сопряжения. Прирост нагрузочной способности отражается показателем П (табл. 1), который представляет собой соотношение $(P_{мп} – P_{мн})/P_{мп}$, где $P_{мп}$ – максимальная нагрузка приработки по методики ГОСТ 23.224-86, $P_{мн}$ – максимальная нагрузка неприработанного сопряжения. Введение наномодифицированной добавки к основному смазочному материалу (И20А), существенно увеличивает значение П, - практически в два раза. При этом, за счет введения дополнительного показателя - скорости роста нагрузочной способности - оказывается возможным ранжировать действие смазочных материалов различного состава (в испытаниях добавлен еще вариант И20+СС+Ш, где Ш – шунгит).

Таблица 1

Рост несущей способности сопряжений торцевого типа в паре латунь - сталь45 при смазывании маслами И20+СС+СЖК, И20А+СС+Ш, И20А+СС, И20А.

Состав смазочного материала	Максимальная нагрузка не-приработанного сопряжения $P_{мн}$, МПа	Максимальная нагрузка приработанного сопряжения $P_{мп}$, МПа	Показатель прирабатываемости П	Показатель скорости роста нагрузочной способности, $P_{мп}/b$, МПа·с$^{-1}$
И20+СС+СЖК	10	30	0,66	0,15
И20А+СС+Ш	10	30	0,66	0,0625
И20А+СС	8	14	0,42	0,062
И20А	6	9	0,33	0,05

Высказанные выше представления о составе и структуре пленки позволяют заключить, что достигнутые высокие показатели несущей способности и антифрикционности объясняются особыми механическими свойствами пленки как коллоидной системы, склонной к легкому формоизменению под действием тангенциальных напряжений. Это свойство способствует выглаживанию поверхности трения и снижению сопротивления скольжению, а значит повышенной прирабатываемости, то есть адаптацией к действию нагрузки. Важно, что для подобных тиксотропных вязкопластических сред (типа Бингама [6]) это происходит без нарушения сплошности, то есть без разрушения, а размеры пленки поддерживаются за счет механизма регенерации, описанного в работе [9].

Полученные результаты испытаний показали не только снижение коэффициента трения, но и повышение износостойкости материалов сопряжения, что дает оценка интенсивности изнашивания, проведенная для пар в среде чистого индустриального масла И20-А и того же масла с добавкой нанодисперсной суспензии серпентина в растворе солей жирных кислот – (И20+СС+СЖК). В таблице 2 показаны ее значения при нагрузке 6 МПа, также в таблице приведены значения вязкости СМ и эффективной пристеночной вязкости пленки, рассчитанные по выше приведенной формуле.

Таблица 2

Показатели износостойкости тяжелонагруженных сопряжений скольжения, а также значения вязкости для различных смазочных композиций

Состав смазочного материала	Интенсивность изнашивания J	Вязкость масла μ (Па·с)	Эффективная пристеночная вязкость пленки $\mu_э$ (Па·с)
И20А	$6{,}9\cdot10^{-9}$	0,026	0,026
И20А + СС + СЖК.	$1{,}29\cdot10^{-11}$	0,026	0,06

При применении масла с добавкой нанодисперсной суспензии серпентина в растворе солей жирных кислот объемная концентрация частиц в пристеночном слое значительно увеличивается за счет того, что большая доля частиц оседает на поверхности. Толщина смазочной пленки, в рассматриваемом случае составляет 0,1 мкм, а диаметр нанодисперсных частиц составляет 0,05 мкм, таким образом объемная концентрация частиц в пристеночном слое составляет не менее 50%.
Из таблицы 2 можно увидеть, что с увеличением эффективной пристеночной вязкости пленки происходит снижение интенсивности изнашивания на два порядка, что согласуется с вышеизложенными заключениями.

Выводы

1. Показано, что применение смазочных материалов, в состав которых входят соли жирных кислот и наноразмерные частицы, обеспечивает высокую эффективность в повышении триботехнических свойств сопряжений скольжения. Механизм повышения износостойкости материалов пары трения сталь - медный сплав при применении наномодифицированных СМ заключается в повышении эффективной пристеночной вязкости в результате роста концентрации мицелл в пристеночном слое за счет роста нагрузки на сопряжение и уменьшения зазора между трущимися поверхностями.
2. При использовании наномодифицированного смазочного материала на поверхности трения образуется остаточная пленка толщиной не менее 100 нм. Вторичная остаточная пленка обладает гетерогенной структурой с включением наночастиц и особыми вязкопластическими свойствами, что позволяет добиться высокой антифрикционности в условиях, когда формирование гидродинамической пленки невозможно. Процесс пленкообразования при применении наномодифицированных смазочных материалов позволяет расширить область допустимых контактных давлений для сопряжений скольжения сталь - медный сплав.

Список литературы

1. Кужаров А.С., Онищук Н.Ю. Металлоплакирущие смазочные материалы / В кн.: Долговечность трущихся деталей машин; под общ. ред. Д. Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1988. – Вып. 3. – С. 96-143.
2. Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н, Третьяков Д.В. Влияние металлоплакирующих добавок к пластичным смазкам на работоспособность трибосопряжений // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2003. – №1 – С.54-66.
3. Поляков С.А., Куксенова Л.И., Кулешова Е.М. Особенности формирования несущей способности сопряжений скольжения при использовании наномодифицированных смазочных материалов // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, №6. – С. 712-719.
4. Кулешова Е.М. Повышение износостойкости червячных передач посредством применения наномодифицированного смазочного материала. Автореф. Диссертации на соиск.уч.степени канд.техн.наук. - М.: БГТУ, 2024. - 23.с.
5. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. - М.: Машиностроение, 1982. - 212 с.
6. Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. - М.: Высшая школа, 2006. - 444 с.
7. Кулешова Е.М. Определение зависимости интенсивности изнашивания от нагрузки по результатам триботехнических испытаний при использовании пленкообразующих

смазочных материалов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2020. – № 3. – С. 116–121.

8. Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. – 268 с.
9. Поляков С.А., Кулешова Е.М., Куксенова Л.И. Повышение несущей способности конструкционных материалов для опор скольжения формированием свойств их поверхностей с помощью пленкообразующих смазочных материалов // В сборнике: Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКом - 2018). Научные труды 4-ой Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН. – 2018. – С. 219-221.

Дата поступления: 22 ноября 2024 г.

DOI: 10.18411/vntr2024-175-3

УДК. 3054

О РАСШИРЕНИИ КЛАССА РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ЛП$_\tau$-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА И ВЕКТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МАШИН

Леонид Борисович Матусов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

matusoff.l@yandex.ru

Аннотация. *В статье исследовано важное свойство, обеспечивающее расширение класса ЛП$_\tau$- последовательностей. Именно эти последовательности используются в известном методе исследования пространства параметров (ИПП -метод) для многокритериальной оптимизации и идентификации механических систем. Точки ЛП$_\tau$- последовательностей используются здесь для расчета в каждой из них математической модели исследуемой системы. В силу того, что эти точки равномерно распределены в пространстве параметров, мы получаем его равномерный обзор. Чем более равномерно распределена эта последовательность, тем более достоверную информацию о свойствах исследуемого объекта можно получить при расчете системы без увеличения количества этих расчетов в точках последовательности. Сложность заключается в том, что для решения практических задач эти свойства равномерности должны выполняться уже при сравнительно небольших количествах точек. Только в этом случае данные последовательности могут быть успешно использованы при решении практических задач, относящихся к теории кубатурных формул, в задачах оптимизации и моделирования машин, механизмов, конструкций и т.д. В данной работе доказано, что можно конструировать ЛП$_\tau$- последовательность так, чтобы у направляющих матриц, соответствующих различным координатам ее точек, все угловые определители были равны I (mod 2). Это расширяет класс ЛП$_\tau$- последовательностей и играет существенную роль для выполнения указанного выше требования.*

Ключевые слова*: равномерно распределенная последовательность, моноциклический оператор, направляющая матрица.*

ON AN EXTENSION OF UNIFORMLY DISTRIBUTED ЛП$_\tau$- SEQUENCES CLASS FOR CALCULATION AND VECTOR OPTIMIZATION OF MACHINES PARAMETERS

L.B. Matusov

Mechanical Engineering Research Institute the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

email:matusoff.l@yandex.ru

Abstract. *The article investigates an important property that provides an extension of the class of ЛП-$_\tau$ sequences. It is these sequences that are used in the well-known parameter space research method (IPP method) for multi-criteria optimization and identification of mechanical systems. The*

points of the ЛП-$_\tau$ sequences are used here to calculate the mathematical model of the system under study in each of them. Due to the fact that these points are evenly distributed in the parameter space, we get a uniform overview of it. The more evenly distributed this sequence is, the more reliable information about the properties of the object under study can be obtained when calculating the system without increasing the number of these calculations at the points of the sequence. The difficulty lies in the fact that to solve practical problems, these properties must be fulfilled already with relatively small numbers of points. Only in this case, these sequences can be successfully used in solving practical problems related to the theory of cubature formulas, in optimization problems, and modeling of machines, mechanisms, structures, etc.It is proved that it is possible to construct an ЛП$_\tau$- sequence so that the guiding matrices corresponding to different coordinates of its points have all angular determinants equal to I (mod 2). This extends the class of ЛП$_\tau$- sequences and plays an essential role in fulfilling the above requirement.

***Key words**: uniformly distributed sequence, monocyclic operator, guiding matrix.*

1.Введение. Для проектирования механизмов, машин и конструкций, оптимизации их параметров был создан метод исследования пространства параметров (метод ИПП) [1]). В основе метода лежит возможность зондировать пространство изменяемых параметров объекта точками равномерно распределенной ЛП$_\tau$- последовательности [1,2].. Чем более равномерно распределена эта последовательность, тем более достоверную информацию о свойствах исследуемого объекта можно получить при расчете системы без увеличения количества этих расчетов в точках последовательности.

Последовательности многомерных точек, могут обладать различными свойствами равномерности [3]. Для решения практических задач эти свойства должны выполняться уже при сравнительно небольших количествах точек. С этой целью в [3] были сформулированы некоторые дополнительные требования к равномерно распределенным последовательностям, а позднее новые условия равномерности, которыми могут обладать, как показано в этой работе, ЛП$_\tau$- последовательности.

2. Конструкция ЛП$_\tau$- последовательностей со свойством В. Будем говорить, что многомерная последовательность

$$P_0, P_1, \ldots, P_i, \qquad (1)$$

обладает свойством В , если для определения каждой из ее координат, качестве в матрицы направляющих числителей взята такая, у которой все угловые определители равны 1(mod 2). И.М. Соболем получен следующий результат. Если в качестве в матрицы направляющих числителей взять такую, у которой все угловые определители равны 1(mod 2), то определенная этой матрицей одномерная ДР - последовательность будет ЛП$_0$-последовательностью.

Возникает вопрос нельзя ли из таких последовательностей, определяющих значения различных координатат многомерных точек, построить ЛП$_\tau$- последовательность? Приводимые ниже результаты дают возможность обобщить на рассматриаемый случай доказанную И.М.Соболем теорему, в которой приводится конструкция ЛП$_\tau$-последовательности.

Пусть L- моноциклический оператор порядка m. Рассмотрим последовательность операторов $L, L^2, \ldots, L^n, \ldots$. Каждому оператору L^n в этой последовательности поставим в соответствии его m линейно независимых решений

$$\{u_{11}^{(n)}, \ldots, u_{k1}^{(n)}, \ldots\}, \ldots, \{u_{1m}^{(n)}, \ldots, u_{km}^{(n)}, \ldots\}, \qquad (2)$$

причем любое решение оператора L^n не является решением оператора L^{n-1}.
При этом первые nm элементов в каждой из последовательностей (2) выбраны так, чтобы в матрице

$$\begin{pmatrix} u_{11}^{(1)} \ldots u_{1m}^{(1)} \ldots u_{11}^{(n)} \ldots u_{1m}^{(n)} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ u_{k1}^{(1)} \ldots u_{km}^{(1)} \ldots u_{k1}^{(n)} \ldots u_{km}^{(n)} \end{pmatrix} \qquad (3)$$

все угловые определители были равны 1(mod 2). Положим, что $\hat{L}^p$ - произвольная степень отличного от L моноциклического оператора $\hat{L}$..

Лемма 1. Операторы $\hat{L}^p$ и L^k не имеют общих решений.

Доказательство. Действительно, пусть $\{u_i\}$- одна из последовательностей в (2) такая, что $L^k(u_i) = 0$. Тогда если бы имело место $\hat{L}^p(u_i) = 0$, то $L^{k-1}\hat{L}^p(u_i) = \hat{L}^p L^{k-1}(u_i) = 0$. А это не так потому, что $L^{k-1}(u_i)$ – есть нетривиальное решение моноциклического оператора L. Но как известно, оно не может быть решением оператора $\hat{L}^p$.

Лемма 2. Результат действия оператора $L\hat{L}^p$ на любые n ($n \le m$) линейно независимые решения оператора L^k есть n линейно независимые решения оператора L^{k-1}.

Доказательство. Покажем сначала, что $\hat{L}^p$ сохраняет линейную независимость решений оператора L^k. Подействуем оператором $\hat{L}^p$ на n решений оператора L^k. Т.к. $\hat{L}^p$ линейный оператор, то линейная зависимость полученных решений означала бы, что $\hat{L}^p(\sum u_{ij}^{(k)}) = 0$, i = 1,2,3,… . Но $\sum_{j=1}^{n} u_{ij}^{(k)}$ есть не тривиальное решение L^k, в силу линейной независимости n выбранных решений. А т.к. решение L^k не может быть решением $\hat{L}^p$, то полученные решения линейно независимы. Теперь подействуем оператором L на рассматриваемые решения оператора L^k. Понятно, что таким образом получим n решений оператора L^{k-1}. Они линейно независимы. Действительно, обратное означает, что $\sum_{j=1}^{n} L(u_{ij}^{(k)}) = L(\sum_{j=1}^{n} u_{ij}^{(k)}) = 0$. Сумма $\sum u_{ij}^{(k)}$ не есть решение оператора L, т.к. матрица (3) содержит все m линейно независимых решений оператора L. Если бы $\sum_{j=1}^{n} u_{ij}^{(k)}$ была решением оператора L, то она выражалась бы линейно через эти m решений. Но это находится в противоречии с условием, что все угловые определители в (3) были равны 1(mod 2).

Теорема. Пусть $L_1, L_2, \ldots, L_n$ - различные моноциклические операторы, порядки которых равны $m_1, m_2, \ldots, m_n$. Каждому оператору L_k поставим в соответствие матрицу $(U_{ij}^{(kl)})$,

аналогичную (3). Пусть $\{ P_i \}$- последовательность точек с координатами, определяемыми этими матрицами. Тогда $P_i = (p^1(i),\ldots,p^n(i))$ – есть $ЛП_\tau$- последовательность в единичном кубе $К^n$ со значениями $\tau = \sum_{k=1}^{n} m_k$ - 1.

Доказательство. Согласно доказательству упомянутой теоремы И.М.Соболя, для того, чтобы произвольный двоичный участок последовательности длины 2^ν был $П_\tau$- сеткой необходимо и достаточно, чтобы ранг матрицы

$$(W_{ij}) = \begin{pmatrix} V_{11}^{(11)} \ldots V_{1\mu_1}^{(1k_1)} \ldots V_{11}^{(n1)} \ldots V_{1\mu_n}^{(nk_n)} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ V_{\nu 1}^{(11)} \ldots V_{1\mu_1}^{(1k_1)} \ldots V_{\nu 1}^{(n1)} \ldots V_{\nu\mu_n}^{(nk_n)} \end{pmatrix}, \qquad (4)$$

составленной из $\nu - \tau$ столбцов матриц направляющих чисел, соответствующих различным моноциклическим операторам, был равен $\nu - \tau$. Обозначим через μ_k' остаток от деления μ_k на m_k так, что $\mu_k = \rho_k m_k + \mu_k'$. Пусть $\rho_1 \geq 1$. Оставим в (4) первые m_1 строк без изменений, а остальные будем заменять линейными комбинациями строк в соответствии с действием оператора L_1. Получим эквивалентную матрицу

$$\begin{pmatrix} V_{11}^{(11)} & \ldots & V_{1m_1}^{(1l_1)} & & & & & \\ . & . & . & & W_{ij} & & & \\ V_{m_1 1}^{(11)} & \ldots & V_{m_1 m_1}^{(1l_1)} & & & & & \\ & & & V_{11}^{'(11)} & \ldots & V_{1\mu_1 - m_1} & & \\ & 0 & & . & . & . & L_1 w_{ij} & \\ & & & V_{\nu-m\ 1}^{'(11)} & \ldots & V_{\nu-m_1\mu_1-m}^{'(1d_1} & & \end{pmatrix} \qquad (5)$$

В верхнем углу, согласно условию теоремы, находится невырожденная матрица. Нетрудно видеть, что столбцы $V_{ij}^{'(1k)}$, $k \leq d_1, j \leq \mu_1 - m_1$, являющиеся участками решений оператора L_1, линейно независимы. Если $\rho_1 > 1$, то в нижней части матрицы (5) повторяем то же преобразование ρ_1 раз. Если $\mu_1' > 0$, то после этих преобразований останутся μ_1' столбцов с элементами $V_{ij}^{'(1l)}$. Перенесем их в конец матрицы. Получим следующую матрицу

$$\begin{pmatrix} B_1 & & & & & & & & & & \\ & \ddots & & & & & & & & & \\ & & B_1 & & & & & & & & \\ & & & \overline{V_{11}^{(21)}} & \ldots & \overline{V_{1\mu_2}^{(2k)_2}} & \ldots & \overline{V_{11}^{(n1)}} & \ldots & \overline{V_{1\mu_n}^{(nk_n)}} & V_{11}^{'(11)} & \ldots & V_{1\mu_1'}^{'(1l')} \\ . & & & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \end{pmatrix} \qquad (6)$$

Согласно лемме 2, $\overline{V_{11}^{(pk_p)}}$, $2 \leq p \leq n$, есть участки решений оператора $L_p^{k_p}$.

В силу этой леммы, столбцы $\overline{V_{ij}^{(21)}}$, $1 \leq j \leq m_2$, образуют матрицу

$B = \begin{pmatrix} \overline{V_{11}^{(21)}} & \dots & \overline{V_{1m_2}^{(21)}} \\ . & . & . \\ \overline{V_{m_2 1}^{(21)}} & \dots & \overline{V_{m_2 m_2}^{(21)}} \end{pmatrix}$, определитель которой равен 1 . Посредством L_2 с нижней частью матрицы (9) (расположенной под B_1) проделаем преобразования, аналогичные предыдущим. Оставшиеся μ_2' столбцов перенесем в конец матрицы. Проделав такие же преобразования со всеми L_k, получим матрицу

$$\begin{pmatrix} B_1 & & & & & & & & & & & & \\ & \ddots & & & & & & & & & & & \\ & & B_1 & & & & & & & & & & \\ & & & B_2 & & & & & & & & & \\ & & & & \ddots & & & & & & & & \\ & & & & & B_2 & & & & & & & \\ & & & & & & \ddots & & & & & & \\ & & & & & & & B_n & & & & & \\ & & & & & & & & \ddots & & & & \\ & & & & & & & & & B_n & & & \\ & & & & & & & & & & V_{11}^{'(11)} & \dots & V_{1\mu_1}^{'(11)} & \dots & V_{11}^{'(n1)} & \dots & V_{1\mu_n'}^{'(n1)} \\ & & & & & & & & & & . & . & . & . & . & . & . \\ & & & & & & & & & & V_{\nu' 1}^{'(11)} & \dots & V_{\nu' \mu_1}^{'(11)} & \dots & V_{\nu' 1}^{'(n1)} & \dots & V_{\nu' \mu_n'}^{'(n1)} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Здесь $\nu' = \mu_1' + \dots + \mu_n' + \tau$ и

$$V_{ij}^{'(k1)} = L \dots L_{k-1}^{\rho_{k-1}} L_{k+1}^{\rho_{k+1}} \dots L_n^{\rho_n} V_{ij}^{(k1)} \quad (8)$$

Если бы все ρ_k были равны 0, то исходная матрица уже имела бы вид (7). В виду того, что в (8) $j \le \mu_k' < m_k$, то $L_k V_{ij}^{'(k1)} = 0$. Значит столбцы остаточной матрицы - это участки решений моноциклических уравнений. Пусть среди μ_k' всего s чисел, отличных от нуля. Обозначим их через μ_f', $1 \le f \le s \le n$. Все решения $V_{ij}^{'(k1)}$, соответсвующие одному f, линейно независимы в силу леммы 1. $\nu' = \sum_{k=1}^{m}(m_k - 1) + \sum_{f=1}^{s}\mu_f' \ge \sum_{f=1}^{s}(m_f + \mu_f' - 1) \ge \sum_{f=1}^{s} m_f$.

Поэтому из утверждения, доказанного И.М.Соболем, следует, что все столбцы остаточной матрицы линейно независимы, т.е., что ее ранг равен $\mu_1' + \dots + \mu_n'$. А ранг всей матрицы равен $\nu - \tau$. Теорема доказана.

Выводы

1.Доказана возможность построения $ЛП_\tau$ - последовательностей, обладающих свойством B.

2.Полученные результаты позволяют строить такие последовательности, применение которых дают возможность решать практические задачи в приемлемое для проектировщиков время.

Список литературы

1. Статников Р., Статников А. Инструментарий метода исследования пространства параметров. - Artech House, Бостон / Лондон. - 2012. - С.215
2. Матусов Л. О некоторых задачах векторной оптимизации сложных механических систем.// Материалы Конференции AIP. - 2022. - т. 2503, вып.1- - С.050025-1 – 050025-8.
3. Matusov L. Some properties of multidimensional sequences, // The XII International Congress "Science, Education and Technology in the Modern World, Papers and Commentaries / USA, Cambridge. - 2015. - Volume 3. - P.102-107.

Дата поступления: 7 ноября 2024 г.

DOI: 10.18411/vntr2024-175-4

УДК 621.036:681.20

УСЛОВИЯ ФИКСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ ПОТОВЫДЕЛЕНИЕМ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

© Александр Анатольевич Шульженко, Михаил Борисович Модестов
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия
aa_shulzhenko.01@mail.ru

Аннотация. *В работе проводится математическое моделирование с целью определения возможности восприятия обратной реакции человека, в виде потовыделения, при использовании нагревателей, обладающих различными физическими свойствами. Приводятся примеры работы в тепловых системах, расположенных на поверхности тела человека, нагревателей с различными массами, теплоемкостями, теплопроводностями. Было выявлено, что при использовании нагревателей, обладающих определенными параметрами у тепловыделяющих элементов, изоляционных материалов, такое восприятие возможно. Моделирование проводилось на базе математических моделей, разработанных авторами, что является новизной. Данные результаты могут использоваться разработчиками изделий для обогрева человека, медицинскими работниками различных профилей.*
Ключевые слова: *электронагреватель, контактный обогрев, потовыделение, КГР, измерение.*

CONDITIONS FOR RECORDING TEMPERATURE CHANGES CAUSED BY HUMAN SWEATING DURING HEAT EXPOSURE

© Alexander Anatolyevich Shul’zhenko, Mikhail Borisovich Modestov
Federal State Budgetary Scientific Institution A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
aa_shulzhenko.01@mail.ru

Abstract. *The paper presents mathematical modeling to determine the possibility of perceiving a person's reverse reaction, in the form of sweating, when using heaters with different physical properties. Examples of operation in thermal systems located on the surface of the human body, heaters with different masses, heat capacities and thermal conductivities are given. It was found that when using heaters with certain parameters in heat-generating elements, insulating materials, such perception is possible. Modeling was carried out on the basis of mathematical models developed by the authors, which is novelty. These results can be used by developers of products for heating a person, medical workers of various profiles.*
Keywords: *woven electric heater, contact heating, sweating, GSR, measurement.*

Различного типа нагреватели уже давно и широко используются в медицинских целях [1]. Например, с их помощью осуществляют тепловое воздействие при лечении радикулита, для компенсации теплопотерь у ожоговых больных [2], для размораживания крови [3] и т.д. Еще одна возможность применения нагревателей была обнаружена совсем недавно. Эта возможность заключалась в отслеживании потовыделения, происходящего под воздействием нагревателей, путем измерения температуры [4, 5], что отличается от методов Фере и Тарханова [6].

Интересным оказался вопрос, при каких условиях становиться возможным отслеживание потовыделения с помощью измерения температуры на поверхности нагревателя [1].

Рассмотрим этот вопрос, для случаев, когда использовались нагреватели, такие как водяные, но в оболочке, или другого типа, например, электрогрелки. С этой целью проведем моделирование распространения температурных изменений, вызванных потовыделением, в тепловой системе, складывающейся на поверхности тела человека. Представим тепловую систему в виде тонкой стенки, состоящей из двух слоев (рис.1) в области при: $x < x_0$ - находится тело человека; $x_0 < x < x_1$ - промежуток между телом человека и нагревателем; $x_1 < x < x_2$ - нагреватель; $x > x_2$ - окружающая среда.

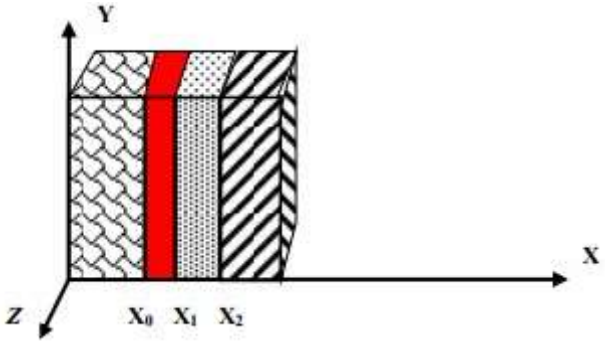


Рис. 1. Тепловая система на поверхности тела человека.

Начальные условия теплового состояния системы.

Будем считать температуру окружающей среды и температуру человека постоянной в течение всего времени проведения эксперимента

$$\Delta T_{sr} = const\,,\ \Delta T_{ch} = const.\ \text{при}\ t \le 0,\quad x_0 < x < x_1 \qquad (1)$$

При описании тепловой системы будем считать, что сам человека является со стороны промежутка между телом и нагревателем внешней средой с постоянным коэффициентом теплоотдачи,

$$\alpha_{ch} = const \qquad (2)$$

Для описания условий на границе между промежутком и телом человека будем использовать граничные условия III рода,

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = \alpha_{ch} \cdot (\Delta T - \Delta T_{ch}) \qquad (3),$$

где λ_1 - коэффициент теплопроводности промежутка между телом человека и нагревателем; $\Delta T = T - T_{cp}$, T - текущее значение температуры; T_{cp} - температура окружающей среды; $\Delta T_{ch} = T_{ch} - T_{cp}$, T_{ch} - температура тела человека.

Для описания тепловых процессов в области промежутка между телом человека и тканым электронагревателем будем использовать уравнение Фурье с переменным коэффициентом теплопроводности [4]

$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_1(t) \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial x}) \quad \text{при } t > 0, x_0 < x < x_1 \qquad (4),$$

ρ_1 - плотность в промежутке; c_1 - удельная теплоемкость промежутка; x_0 - поверхность тела человека; x_1 - поверхность нагревателя со стороны промежутка; $\lambda_1(t)$ - коэффициент теплопроводности промежутка между телом человека и нагревателем.

При моделировании с помощью граничных условий II рода описывались тепловые процессы между промежутком и нагревателем

$$-\lambda_1 \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial x}\Big|_{x=x_1} = -\lambda_2 \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial x}\Big|_{x=x_1} \quad \text{при} \quad t > 0, \quad x = x_1 \qquad (5),$$

где λ_2 - коэффициент теплопроводности нагревателя.

Тепловые процессы в области нагревателя описывались уравнением Фурье с внутренним источником

$$\rho_2 \cdot c_2 \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial t} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} + q_v \quad \text{при} \quad t > 0, \quad x_1 < x < x_2 \qquad (6),$$

где q_v - объемное тепловыделение источника тепла; ρ_2 - плотность нагревателя; c_1 - удельная теплоемкость нагревателя.

На поверхности теплоизоляционного слоя применялись граничные условия III рода

$$-\lambda_2 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = -\alpha_{sr}(\Delta T_{ch} - \Delta T) \quad \text{при} \quad t > 0, \quad x = x_3 \qquad (7)$$

где $\alpha_{sr} = const$ - коэффициент теплоотдачи в окружающую среду является постоянной величиной.

Таким образом, используя выражения (1) - (7) смешанную задачу Коши можно представить

$$\begin{cases} \Delta T = \Delta T_{ch} \quad \text{при} \quad t = 0, \quad x = x_0 \\ \Delta T = \Delta T_{sr} = 0 \quad \text{при} \quad t = 0, \quad x = x_2 \\ -\lambda_1 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = -\alpha_{ch}(\Delta T_{ch} - \Delta T) \quad \text{при} \quad t > 0, \quad x = x_0 \\ \rho_1 \cdot c_1 \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_1(t) \frac{\partial \Delta T}{\partial x}) \quad \text{при} \quad t > 0, \quad x_0 < x < x_1 \\ -\lambda_1 \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial x}\Big|_{x=x_1} = -\lambda_2 \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial x}\Big|_{x=x_1} \quad \text{при} \quad t > 0, \quad x = x_1 \\ \rho_2 \cdot c_2 \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial t} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} + q_v \quad \text{при} \quad t > 0, \quad x_1 < x < x_2 \\ -\lambda_2 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = -\alpha_{sr}(\Delta T_{ch} - \Delta T) \quad \text{при} \quad t > 0, \quad x = x_2 \end{cases} \qquad (8)$$

Далее, на основании сформулированной задачи (8), используя метод конечных разностей [7, 8], была написана программа [9].

Решая поставленную задачу для постоянных внешних условий в тепловой системе, но для различных параметров нагревателей, был получен результат, показывающий, что изменения температуры, вызванные потовыделением, в промежутке между нагревателем и телом человека под воздействием нагрева, могут, как подавляться, так и хорошо распространяться в пределах тепловой системы.

Рассмотрим, как будет распространяться тепловой сигнал при использовании нагревателя, созданного на основе материалов, обладающих малой массой, малой теплоемкостью, но достаточно большой теплопроводностью.

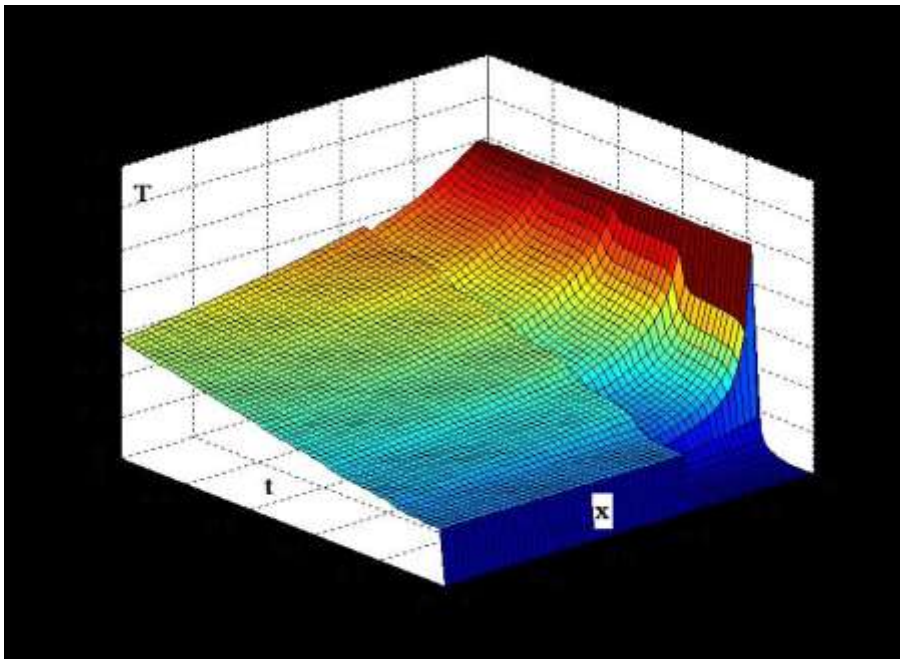


Рис. 2. Распространение изменений температуры во времени в пределах тепловой системы на поверхности тела человека при использовании нагревателя, обладающего малой массой, малой теплоемкостью и хорошей теплопроводностью.

Как хорошо видно на рис. 2, температурные колебания во времени, вызванные колебаниями коэффициента теплопроводности в области промежутка между телом человека и нагревателем за счет потовыделения, хорошо распространяются во всем пространстве тепловой системы.

Эти результаты математического моделирования хорошо совпадают с результатами, полученными в ходе натурного эксперимента. Термопара располагалась на поверхности нагревателя со стороны промежутка между телом человека и нагревателем (рис. 3).

Далее рассмотрим, какие происходят изменения в распространении колебаний температуры в тепловой системе при использовании нагревателя с большей массой и теплоемкостью, по сравнению с первым случаем, но при теплопроводности, как и в первом случае (рис. 4).

Колебания температуры в тепловой системе переместились в сторону к телу человека и их интенсивность существенно уменьшилась.

Однако, в этом случае, при повышении теплопроводности нагревателя можно опять добиться распространения изменений температуры за счет потовыделения в тепловой системе, аналогичного распространению температуры, показанному на рис. 2.

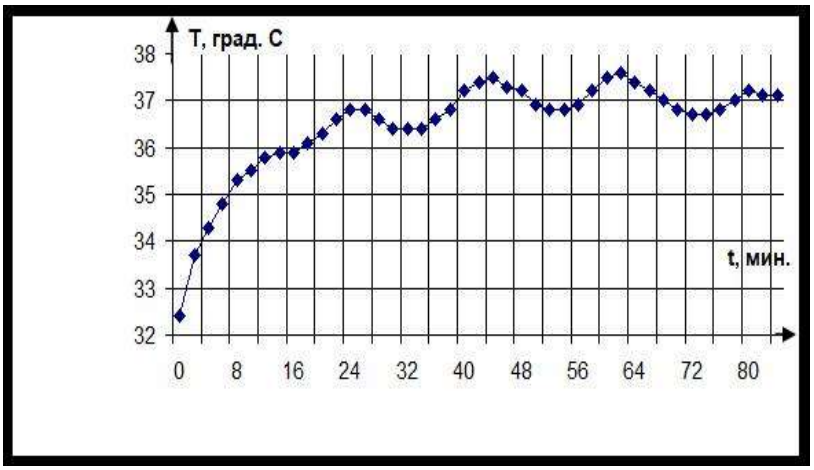


Рис. 3. Изменения температуры во времени на поверхности нагревателя, находящегося на теле человека и обладающего малой массой, малой теплоемкостью и хорошей теплопроводностью.

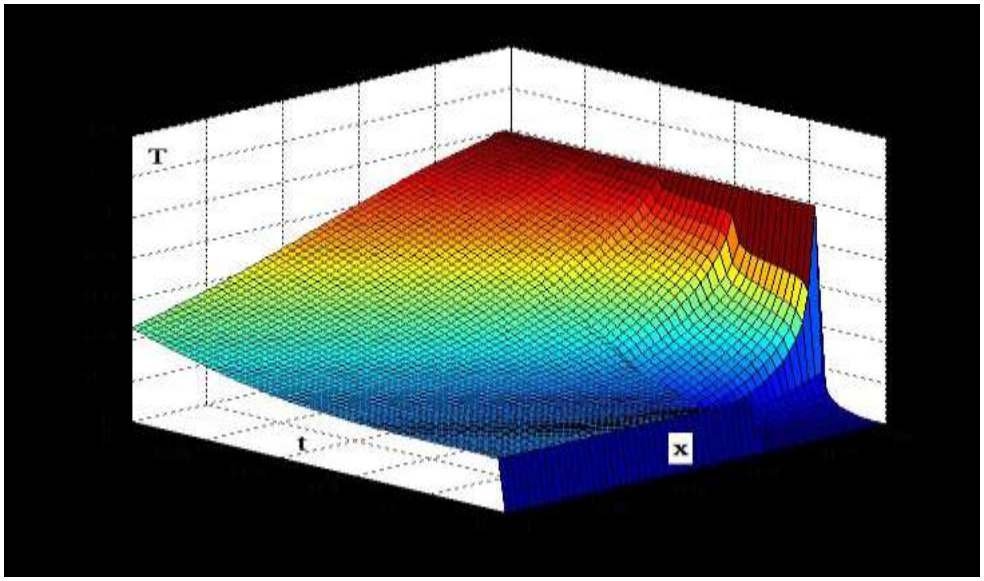


Рис. 4. Распространение изменений температуры во времени в пределах тепловой системы на поверхности тела человека при использовании нагревателя, обладающего большой массой, теплоемкостью и хорошей теплопроводностью.

Теперь посмотрим, что будет происходить в пределах этой же тепловой системы (для случая, показанного на рис. 4), но, если будем снижать теплопроводность нагревателя, то есть и масса, и теплоемкость, будут достаточно большими, а теплопроводность - низкая, например, как при использовании нагревателя в виде водяной грелки, (рис. 5).

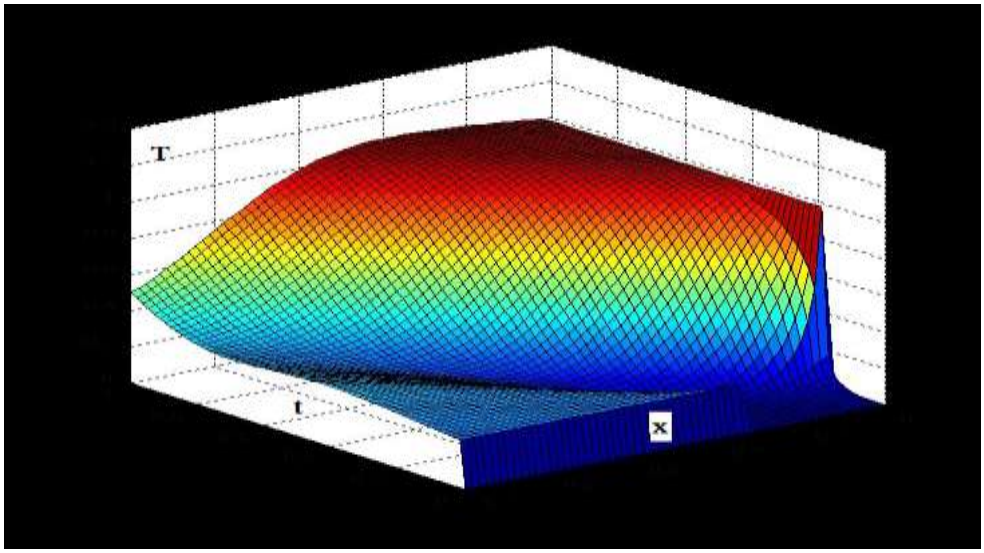


Рис. 5. Распространение изменений температуры во времени в пределах тепловой системы на поверхности тела человека при использовании нагревателя, обладающего большой массой, теплоемкостью и низкой теплопроводностью.

Как видно на рис. 5, колебания температуры во времени, не только в области нагревателя, а и вообще в тепловой системе совершенно пропали.

Конечно, рассмотренный пример происходящих на поверхности тела человека тепловых процессов в двухслойной тонкой стенке является упрощенным представлением реальной тепловой картины.

В действительности, используемый нагреватель и, в целом, вся тепловая система намного сложнее, но даже такое упрощенное представление дает возможность убедиться, что на распространение теплового сигнала от тела человека, отражающего реакцию человека в виде потовыделения, оказывает существенное влияние теплофизические параметры элементов тепловой системы.

То есть, для получения возможности распространения сигнала с целью его дальнейшей фиксации необходимо решить много критериальную задачу, связанную с тепловыми свойствами всех элементов, участвующих в работе тепловой системы, их согласования.

Список литературы

1. Vissler E.H. Human. Temperature. Control. B. - Springer, 2018. - 425 с.
2. Алексеев А.А., Виноградов В.Л., Модестов М.Б., Модестова О.Б., Чуйко Т.В., Шульженко А.А. Способ компенсирования теплопотерь у ожоговых больных. Патент № 2701170, М., 2019, Бюллетень № 27.
3. Шульженко А.А., Мнев Б.А., Модестов М.Б., Модестов Б.М. Способ размораживания жидких медицинских и пищевых продуктов и устройство его реализации. Патент РФ № 2552822, М., 2015, Бюллетень № 16.
4. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Моделирование реакции человека на тепловое воздействие // Вестник научно-технического развития. – 2017. - № 5. - с. 23-33.
5. Шульженко А.А., Модестов М.Б., Модестов Б.М. Способ измерения реакции потовых желез человека при наличии теплового воздействия. Патент № 2578864, М., 2016, Бюллетень № 9.

6. Суходоев В.В. Модифицированная методика измерений и оценки кожно-гальванических реакций. - М.: ИП РАН,1990. - 84 с.
7. *Плохотников К.Э.* Вычислительные методы. Теория и практика в среде МАТЛАБ. Учебное пособие для вузов. - М.: Горячая линия - Телеком, 2013. - 496 с.
8. *Кузнецов Г.В., Шеремет М.А.* Разностные методы решения задач теплопроводности. – Томск: Из-во ТПУ, 2007. - 172 с.
9. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Программа моделирования проявления новых возможностей тканого электронагревателя. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020618044, М., 2020.

Дата поступления: 18 ноября 2024 г.