

УДК 537.9

DOI 10.25587/2222-5404-2024-21-4-73-80

## Динамика 2-краудиона и перенос энергии в вольфраме: атомистическое моделирование

Ю. Р. Шарапова<sup>1</sup>, А. М. Казаков<sup>1</sup>, М. Н. Семёнова<sup>2</sup>✉, Ж. Г. Рахматуллина<sup>1,3</sup>,  
Д. Р. Тимербаев<sup>1</sup>, Е. А. Корзникова<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия

<sup>2</sup>Политехнический институт (филиал) СВФУ, г. Мирный, Россия

<sup>3</sup>Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа, Россия

✉ mariya\_semyonova86@mail.ru

**Аннотация.** Миграция точечных дефектов в металлах способствует переносу массы и энергии при пластической деформации, термообработке, облучении и т. д. В связи с этим изучение таких физических процессов нелинейной динамики кристаллической решетки металлов является актуальной задачей. В данной работе исследуется динамика 2-краудиона и процессы переноса энергии в вольфраме, направленные на понимание механизмов формирования дефектов и диссипации энергии в условиях экстремальных температур и давления. Известно, что кристаллические решетки под внешним воздействием накапливают большое количество дефектов, таких как вакансии, дислокации, границы зерен. Все эти дефекты создают поля внутренних напряжений, которые будут влиять на динамику краудионов. С использованием метода молекулярно-динамического моделирования и модели погруженного атома было изучено распространение 2-краудионов в трехмерной структуре. Основные результаты показывают, что формирование 2-краудионов происходит при критических значениях энергии возбуждения и зависит от начальной конфигурации системы, где 2-краудионы инициируют цепные процессы переноса энергии по атомной решетке. Выявлено, что глубина прохождения 2-краудиона линейно зависит от величины начальной энергии. Полученные пространственно-временные характеристики распределения энергии демонстрируют роль 2-краудионов в локальной концентрации энергии и последующей ее передаче через атомные связи, что приводит к образованию точечных дефектов. Эти результаты важны для проектирования новых радиационно-стойких материалов, поскольку помогают предсказать устойчивость материала к высокоэнергетическим воздействиям. Работа вносит вклад в понимание физических основ диссипации энергии и поведения дефектов в тугоплавких материалах, применимых в условиях термоядерного синтеза и других высокотемпературных процессов.

**Ключевые слова:** вольфрам, дефекты кристаллической решетки, вакансии, дислокация, краудионы, перенос энергии, нелинейная динамика, потенциал взаимодействия, метод молекулярной динамики, моделирование.

**Для цитирования:** Шарапова Ю. Р., Казаков А. М., Семёнова М. Н., Рахматуллина Ж. Г. Тимербаев Д. Р., Корзникова Е. А. Динамика 2-краудиона и перенос энергии в вольфраме: атомистическое моделирование. *Вестник СВФУ*. 2024, Т. 21, № 4. С. 73–80. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-4-73-80

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ФГБОУ ВО «УУНТ» (соглашение №075-03-2023-119/1) молодежной научно-исследовательской лаборатории НОЦ «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях» для Ю. Р. Шарловой (проведение расчетов) и М. М. Казакова (анализ и обсуждение полученных результатов). М. Н. Семёнова (постановка задачи и моделирование) благодарит за поддержку исследования Российский научный фонд, грант 24-22-00092.*

## Dynamics of 2-crowdion and energy transfer in tungsten: atomistic modeling

Yu. R. Sharapova<sup>1</sup>, A. M. Kazakov<sup>1</sup>, M. N. Semyonova<sup>2</sup>✉, Zh. G. Rahmatullina<sup>1,3</sup>,  
D. R. Timerbaev<sup>1</sup>, E. A. Korznikova<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

<sup>2</sup>Polytechnic Institute (branch) of M.K. Ammosov NEFU, Mirny, Russia

<sup>3</sup>Institute for Metals Superplasticity Problems of RAS, Ufa, Russia

✉ mariya\_semyonova86@mail.ru

**Abstract.** The migration of point defects in metals contributes to the transfer of mass and energy during plastic deformation, heat treatment, irradiation, etc. In this regard, the study of such physical processes of nonlinear dynamics of the crystal lattice of metals is an urgent task. In this paper, the dynamics of 2-crowdion and the processes of energy transfer in tungsten are studied, aimed at understanding the mechanisms of defect formation and energy dissipation under extreme temperatures and pressures. It is known that crystal lattices accumulate a large number of defects under external influence, such as vacancies, dislocations, and grain boundaries. All these defects create internal stress fields that will affect the dynamics of crowdions. Using the methods of molecular dynamic modeling and embedded atom model, the propagation of 2-crowdions in a three-dimensional structure was studied. The main results show that the formation of 2-crowdions occurs at critical values of the excitation energy and depends on the initial configuration of the system, where 2-crowdions initiate chain processes of energy transfer through the atomic lattice. It is revealed that the depth of passage of the 2-crowdion linearly depends on the magnitude of the initial energy. The obtained spatiotemporal characteristics of the energy distribution demonstrate the role of 2-crowdions in the local concentration of energy and its subsequent transfer through atomic bonds, which leads to the formation of point defects. These results are important for the design of new radiation-resistant materials, as they help predict the material's resistance to high-energy influences. The work contributes to the understanding of the physical foundations of energy dissipation and the behavior of defects in refractory materials used in thermonuclear fusion and other high-temperature processes.

**Keywords:** tungsten, crystal lattice defects, vacancy, dislocation, crowdions, energy transfer, nonlinear dynamics, interaction potential, molecular dynamics method, modeling.

**For citation:** Sharapova Yu. R., Kazakov A. M., Semyonova M. N., Rahmatullina Zh. G., Timerbaev D. R., Korznikova E. A. Dynamics of 2-crowdion and energy transfer in tungsten: atomistic modeling. *Vestnik of NEFU*. 2024, Vol. 21, No. 4. Pp. 73–80. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-4-73-80

*The research was conducted with the financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment of Ufa University of Science and Technology (Agreement No. 075-03-2023-119/1) of the Youth Scientific Research Laboratory of the Research and Educational Center “Metals and Alloys under Extreme Impacts” to Yu. R. Sharapova (performing calculations) and M. M. Kazakov (analysing and discussing the results obtained). M. N. Semyonova (problem formulation and modeling) acknowledges support from the Russian Science Foundation (grant 24-22-00092).*

### Введение

Экстремальные воздействия, такие как лазерная обработка [1], интенсивная пластическая деформация [2], сверхбыстрая нагрузка [3, 4] облучение [5], плазменная обработка [6] вызывают необратимые изменения в кристаллической структуре и приводят к переходу решетки в неравновесное состояние. В этих процессах атомы сильно отклоняются от своих равновесных положений, и нелинейная природа

межатомных связей начинает играть значительную роль. Такие воздействия вызывают появление аномально высокой концентрации точечных дефектов, известных как пары Френкеля (вакансия и междоузельный атом) [7].

Междоузельный атом может существовать в различных конфигурациях, включая конфигурацию краудиона, когда он располагается в плотноупакованном атомном ряду [8]. Краудион – это разновидность точечного дефекта, который достаточно часто возникает в процессе экстремальных воздействий в металлах с плотноупакованными гранецентрированными кубическими (ГЦК) и объемноцентрированными кубическими (ОЦК) решетками. Краудионы обладают высокой подвижностью, что позволяет им перемещаться вдоль плотноупакованного ряда с дозвуковой и даже сверхзвуковой скоростью, перенося массу и энергию. Краудионы имеют значительно более высокую миграционную способность по сравнению с вакансиями [2, 9] что делает их эффективными для массопереноса в материалах. Высокая миграционная способность краудионов приводит к их быстрой аннигиляции, это затрудняет экспериментальный анализ их структуры и движения. Поэтому широко используются методы компьютерного моделирования, такие как молекулярная динамика [10, 11], метод Монте-Карло [12], методы первых принципов [13] и многомасштабное моделирование [14]. Для данного исследования был выбран метод молекулярной динамики, поскольку он обеспечивает значительный выигрыш во времени по сравнению с более вычислительно затратными методами, такими как методы первых принципов. Кроме того, результаты молекулярно-динамического моделирования демонстрируют хорошее совпадение с данными, полученными другими методами моделирования, что подтверждает надежность и точность этого метода для описания динамики краудионов.

Важность краудионов также связана с их ролью в процессах, происходящих в условиях, далеких от равновесия, например, в условиях интенсивной пластической деформации металлов и сплавов [15]. Было показано, что кластеры междоузельных атомов, формирующиеся при облучении, обладают высокой подвижностью [16]. Эти междоузельные дефекты могут существовать в виде неподвижных или подвижных краудионов, которые могут двигаться с дозвуковыми или сверхзвуковыми скоростями [17].

В металлах с ОЦК-решеткой, таких как вольфрам, краудионы могут играть значительную роль в процессах массопереноса под воздействием внешних факторов, включая облучение и термоядерные условия [18]. Вольфрам является ключевым материалом для термоядерного реактора ITER [19], что подчеркивает важность исследований его дефектной структуры [20], особенно в контексте сверхзвуковых краудионов [21]. Несмотря на известную роль краудионов в процессах массопереноса в металлах с ОЦК-решеткой, динамика 2-краудионов и их вклад в перенос энергии остаются недостаточно изученными. Актуальность исследования обусловлена потребностью в проектировании радиационно-стойких материалов, применимых в условиях термоядерного синтеза, где влияние высокоэнергетических воздействий на дефектную структуру материала играет ключевую роль.

Цель данной работы – изучение процессов переноса энергии в вольфраме с использованием молекулярной динамики для анализа поведения сверхзвуковых 2-краудионов.

### **Методы исследования**

Атомистическое моделирование проводилось с использованием свободного пакета для классической молекулярной динамики Large scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator (LAMMPS) [22] и модели погруженного атома (Embedded Atom Model – EAM) для вольфрама [23]. Программа Open Visualization Tools (OVITO) была использована для визуализации результатов моделирования [24].

Расчетная ячейка представляет собой модель ОЦК монокристалла вольфрама, координатные оси  $x$ ,  $y$ ,  $z$  которого ориентированы вдоль кристаллографических

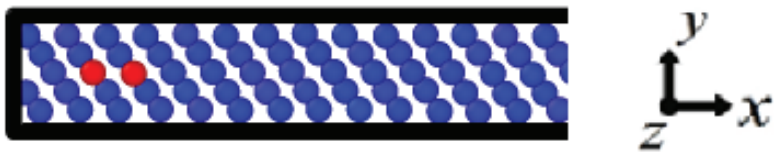


Рис. 1. Визуализация расчетной ячейки  
Fig. 1. Visualisation of the simulation cell

направлений  $[111]$ ,  $[1-10]$  и  $[11-2]$ , соответственно. Параметр решетки вольфрама  $a$  равен  $3,14 \text{ \AA}$ . В расчетной ячейке содержится 35000 атомов, что соответствует размерам  $390,7 \times 5,6 \times 6,8 \text{ \AA}$ . Периодические граничные условия были приложены по всем трем ортогональным направлениям. На рис. 1 показан край расчетной ячейки, из которого 2-краудион начинает движение вдоль оси  $x$ . Для запуска 2-краудиона двум соседним атомам задается импульс с начальной энергией  $E=84 \text{ эВ}$ . Начальные перемещения и скорости всех остальных атомов в ячейке равны нулю. Моделирование проводилось до 10 пс, в течение которого отслеживались перемещения атомов, а также фиксировались значения их полной энергии.

Результаты и обсуждение

Поскольку распространение 2-краудиона рассматривается в наиболее плотно-упакованном ряду кристаллической решетки, происходит интенсивное столкновение между атомами, что приводит к рассеиванию энергии по всем направлениям. На рис. 2 показаны относительные смещения атомов вдоль оси  $x$ .

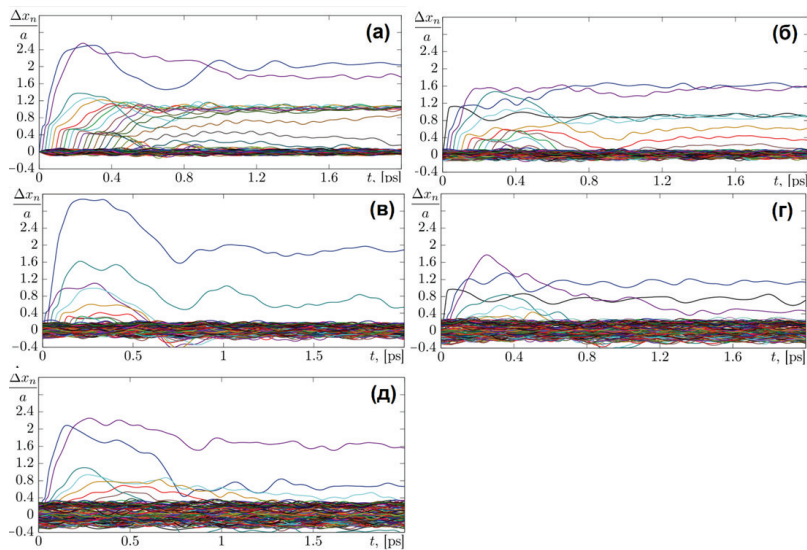
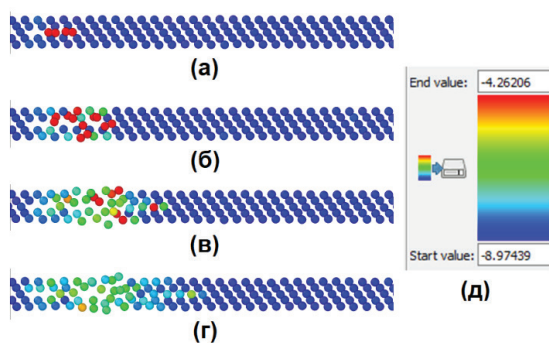


Рис. 2. Относительные смещения атомов вдоль оси  $x$  в процессе моделирования:  
(а) – с начала моделирования; (б) – спустя 1 пс после начала моделирования;  
(в) – спустя 2 пс после начала моделирования; (г) – спустя 3 пс после начала моделирования; (д) – спустя 4 пс после начала моделирования

Fig. 2. Relative displacements of atoms along the  $x$ -axis during the simulation: (a) – from the start of the simulation; (b) – 1 ps after the start of the simulation; (c) – 2 ps after the start of the simulation; (d) – 3 ps after the start of the simulation; (e) – 4 ps after the start of the simulation



**Рис. 3.** Распространение 2-краудиона в вольфраме: (а) – первое взаимодействие; (б), (в), (г) – атомная структура спустя 1,5, 3 и 4,5 пс после начала моделирования; (д) – цветовая шкала распределения энергий

**Fig. 3.** Propagation of 2-crowdion in tungsten: (a) – first interaction; (b), (c), (d) – atomic structure of 1.5, 3 and 4.5 ps after the start of the simulation; (e) – colour scale of energy distribution

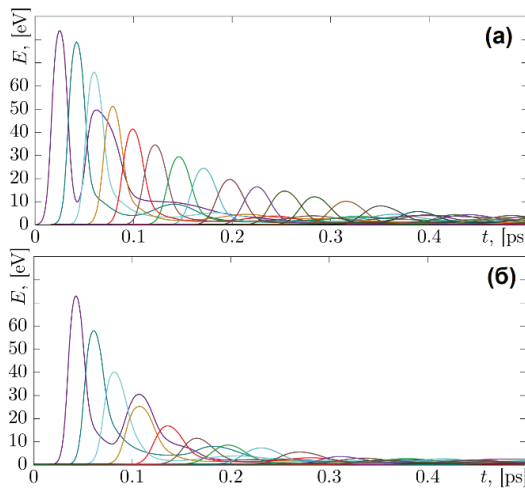
Из анализа рис. 2 следует, что по мере увеличения времени моделирования возмущения распространяются на большее количество атомов, при этом число атомов с высокоамплитудными смещениями снижается. Этот эффект свидетельствует о том, что 2-краудион передает значительную часть своей энергии при столкновениях с соседними атомами, что приводит к постепенному снижению его энергии и распространению ее в глубь расчетной области. В результате трансфер энергии зависит не только от приложенной энергии, но и от плотности атомов вблизи траектории движения 2-краудиона. Анализ смещений атомов вдоль других осей показывает аналогичную динамику, но амплитуды этих смещений в среднем ниже в  $1,5 \div 2$  раза. На рис. 3 представлена структура расчетной ячейки в процессе распространения 2-краудиона, что иллюстрирует изменение конфигурации атомов во времени.

В ходе продвижения 2-краудиона вглубь расчетной ячейки основные носители энергии – атомы, движущиеся вдоль траектории – постепенно теряют свою энергию из-за многократных столкновений. Как видно на рис. 3, уже спустя 4,5 пс после первого взаимодействия 2-краудион достиг значительной глубины в решетке вольфрама, при этом его энергия уменьшилась в  $1,6 \div 1,7$  раз от начального значения.

Для лучшего понимания динамики изменения энергии атомов в процессе моделирования на рис. 4 представлена зависимость энергии атомов от времени. Эта зависимость помогает отслеживать закономерности энергообмена между атомами, вовлеченными в процесс распространения 2-краудиона, и отражает общее снижение энергии системы.

Как показано на рис. 4, к моменту 1 пс после начала моделирования максимальная энергия 2-краудиона снижается на  $13 \div 15\%$  от начального значения. При этом в процессе многократных столкновений атомов средняя энергия возбужденных атомов уменьшается значительно быстрее. Таким образом, средняя энергия атомов, вовлеченных в процесс взаимодействия, показывает существенное снижение, что говорит о перераспределении энергии и постепенном ее переходе к окружающим атомам в результате рассеяния.

При дальнейшем исследовании поведения 2-краудиона (после 1 пс до 10 пс) в структуре вольфрама наблюдается сохранение общей тенденции распределения энергии: максимальные значения энергии по мере увеличения времени и количества взаимодействий уменьшаются по линейной зависимости, тогда как средняя энергия возбужденных атомов убывает по экспоненциальной кривой, что свидетельствует о быстрой передаче энергии в процессе взаимодействия.



**Рис. 4.** Зависимость энергии атомов от времени: (а) – в начале моделирования;  
(б) – спустя 1 пс после начала моделирования  
**Fig. 4.** The dependence of energy of atoms on time: (a) – at the beginning of the simulation;  
(b) – 1 ps after the beginning of the simulation

Изменение величины начального энергетического импульса существенно влияет на глубину прохождения дефекта. Было исследовано влияние глубины прохождения дефекта от значения начальной энергии 2-краудиона в интервале 84÷164 эВ с шагов 10 эВ. Оказалось, что во всем рассмотренном интервале глубина прохождения 2-краудиона линейно зависит от его начальной энергии. Предположительно, дальнейшее увеличение начальной энергии до какого-то критического значения будет аналогично влиять на глубину прохождения дефекта. После преодоления такого критического значения увеличение начальной энергии будет влиять на дальность распространения 2-краудиона все меньше, поскольку в таком случае 2-краудион будет испытывать чрезмерное количество столкновений, и часть энергии будет уходить в формы деформации и тепловых возбуждений соседних атомов. Критическое значение начальной энергии нельзя определить однозначно, поскольку данный параметр зависит от используемого межатомного потенциала, кристаллографической ориентации и других параметров моделирования. В нашем случае начальная энергия 2-краудионов в диапазоне от 84 до 164 эВ (с шагом 10 эВ) соответствует глубине прохождения дефекта в интервале 18÷57 межатомных расстояний (с шагом 4÷5  $a$ ).

### Заключение

Результаты данной работы позволяют углубить понимание поведения 2-краудионов в вольфраме и их роли в процессе передачи энергии в кристаллической решетке. В ходе моделирования показано, что 2-краудион, имея начальную энергию 84 эВ, быстро передает значительную часть своей энергии атомам, расположенным вдоль траектории движения. Уже через 4,5 пс после начала движения энергия 2-краудиона снижается в 1,6÷1,7 раз от начального значения. Максимальные значения энергии атомов по мере увеличения времени уменьшаются линейно, в то время как средняя энергия возбужденных атомов убывает экспоненциально, свидетельствуя о быстром распределении энергии вглубь решетки. Обнаружено, что глубина прохождения дефекта линейно зависит от величины начальной энергии 2-краудиона. Дальнейшие исследования могут сосредоточиться на моделировании различных начальных параметров краудионов и их взаимодействии с дефектами структуры, что позволит лучше прогнозировать

устойчивость материалов к радиационным воздействиям и их способность к эффективному переносу энергии.

Практическая значимость данных результатов заключается в возможности их использования при проектировании материалов, устойчивых к радиационным и термическим воздействиям, например, для компонентов термоядерных реакторов. Понимание механизмов передачи энергии краудионами и их зависимости от начальных параметров позволяет более точно предсказывать поведение материалов при воздействии высокоэнергетичных частиц, что особенно важно для разработки конструкционных материалов, устойчивых к деградации под влиянием экстремальных условий эксплуатации.

### Л и т е р а т у р а / R e f e r e n c e s

1. Wei Q, Schuster BE, Mathaudhu SN, et al. Dynamic behaviors of body-centered cubic metals with ultrafine grained and nanocrystalline microstructures. Elsevier: Materials Science and Engineering: A, 2008;493:58-64 (in English).
2. Shepelev IA, Chetverikov AP, Dmitriev SV, Korznikova EA. Shock waves in graphene and boron nitride. Computational materials science, 2020;177:109549 (in English).
3. Zhang Zh, Yabuuchi K, Kimura A. Defect distribution in ion-irradiated pure tungsten at different temperatures. Journal of Nuclear Materials, 2016;480:207-215 (in English).
4. Zhou WH, Zhang CG, Li YG, Zeng Z. Transport, dissociation and rotation of small self-interstitial atom clusters in tungsten. Journal of Nuclear Materials, 2014;453(1-3):202-209 (in English).
5. Granberg F, Byggmastar J, Nordlund K. Molecular dynamics simulations of high-dose damage production and defect evolution in tungsten. Journal of Nuclear Materials, 2021;556:153158 (in English).
6. Bharwaj U, Sand AE, Warrier M. Graph theory based approach to characterize self interstitial defect morphology. Computational Materials Science, 2021;195:110474 (in English).
7. Pokropivny VV, Skorokhod VV, Pokropivny AV. Adhesive phenomena at the  $\alpha$ -Fe interface during nanoindentation, stretch and shock. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 1997;5(6):579 (in English).
8. Chartier A, Marinica M-C. Rearrangement of interstitial defects in alpha-Fe under extreme condition. Acta Materialia, 2019;180:141-148 (in English).
9. Castin N, Bakaev A, Bonny G, et al. On the onset of void swelling in pure tungsten under neutron irradiation: An object kinetic Monte Carlo approach. Journal of Nuclear Materials, 2017;493:280-293 (in English).
10. Kolesnikov ID, Shepelev IA. Excitation and propagation of 1-crowdion in BCC niobium lattice. Materials. Technologies. Design. 2022;4(1):5-10 (in English).
11. Yankovskaya UI, Zakharov PV. Heat resistance of a Pt crystal reinforced with CNT's. Materials. Technologies. Design. 2021;3(4):64-67 (in English).
12. Chen L, Li LQ, Gong HR. Irradiation effect on mechanical properties of tungsten from molecular dynamic simulation. Materials Letter, 2019;241:27-30 (in English).
13. Korznikova EA, Shunaev VV, Shepelev IA, et al. Ab initio study of the propagation of a supersonic 2-crowdion in fcc Al. Computational Materials Science, 2022;204(2):111125 (in English).
14. Barani E, Korznikova EA, Chetverikov AP, et al. Gap discrete breathers in strained boron nitride. Physics Letter A, 2017;381(41):3553-3557 (in English).
15. Dudarev SL. Coherent motion of interstitial defects in a crystalline material. In: Multiscale Modelling of Nano- and Micro-mechanics of Materials. Philosophical Magazine, 2003;83(31-34):3577-3597 (in English).
16. Terentyev DA, Malerba L, Hou M. Dimensionality of interstitial cluster motion in bcc-Fe. Physical Review B, 2007;75:104108 (in English).
17. Zhou WH, Zhang CG, Li YG, Zeng Z. Creeping Motion of Self Interstitial Atom Clusters in Tungsten. Scientific Reports, 2014;4:5096 (in English).
18. Mason DR, Sand AE, Yi X, Dudarev SL. Direct observation of the spatial distribution of primary cascade damage in tungsten. Acta Materialia, 2018;144:905-917 (in English).

19. Kazakov AM, Babicheva RI, Zinovev A, et al. Interaction of edge dislocation with voids in tungsten. *Tungsten*, 2024;6:633-646 (in English).
20. Chetverikov AP, Ebeling W, Velarde MG. Properties of nano-scale soliton-like excitations in two-dimensional lattice layers. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2011;240:1954-1959 (in English).
21. Caturia MJ. Object kinetic Monte Carlo methods applied to modeling radiation effects in materials. *Computational Materials Science*, 2019;156:452-459 (in English).
22. Plimpton S. Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics. *Journal of Computational Physics*, 1995;117(1):1-19 (in English).
23. Bonny G, Bakaev A, Terentyev D, Mstrikov YuA. Interatomic potential to study plastic deformation in tungsten-rhenium alloys. AIP Publishing: *Journal of Applied Physics*, 2017;121(16):165107 (in English).
24. Stukowski A. Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO—the Open Visualization Tool. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2009;18(1):015012 (in English).

---

*ШАРАПОВА Юлия Равильевна* – инженер-исследователь молодежной НИЛ «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях», ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий».

E-mail: ulya\_usinsk@mail.ru

*Yulia R. SHARAPOVA* – Researcher engineer, Youth Scientific Research Laboratory of Metals and Alloys under Extreme Impacts, Ufa University of Science and Technology.

*КАЗАКОВ Арсений Максимович* – инженер-исследователь молодежной НИЛ «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях», ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий».

E-mail: arseny.m.kazakov@gmail.com

*Arseny M. KAZAKOV* — Researcher engineer, Youth Scientific Research Laboratory of Metals and Alloys under Extreme Impacts, Ufa University of Science and Technology.

*СЕМЁНОВА Мария Николаевна* – к. ф.-м. н., доцент кафедры ФиПМ, Политехнический институт (филиал) ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова».

E-mail: mariya\_semyonova86@mail.ru

*Mariya N. SEMYONOVA* — Cand. Sci. (Phys. and Math.), Assoc. Prof., Department of Fundamental and Applied Mathematics, Polytechnic Institute (branch) of NEFU.

*РАХМАТУЛЛИНА Жанна Геннадьевна* – к. ф.-м. н., м. н. с. молодежной НИЛ «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях», ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»; ФГБУН «Институт проблем сверхпластичности металлов РАН».

E-mail: ishmitovazhanna@mail.ru

*Zhanna G. RAKHMATULLINA* – Cand. Sci. (Phys. and Math.), Junior Researcher, Youth Scientific Research Laboratory of Metals and Alloys under Extreme Impacts, Ufa University of Science and Technology, Institute for Metals Superplasticity Problems of RAS.

*ТИМЕРБАЕВ Дмитрий Рамилевич* – ведущий инженер Института компьютерных исследований, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий».

E-mail: mity99@ya.ru

*Dmitry R. TIMERBAEV* – Lead. Engineer at the Institute of Computer Research, Ufa University of Science and Technology.

*КОРЗНИКОВА Елена Александровна* – д. ф.-м. н., профессор, зав. молодежной НИЛ «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях», ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»; проф. каф. электротехники и автоматизации промышленного производства Политехнического института (филиала), ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»; ФГБУН «Институт проблем сверхпластичности металлов РАН».

E-mail: elena.a.korznikova@gmail.com

*Elena A. KORZNIKOVA* – Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Head of the Youth Scientific Research Laboratory of Metals and Alloys under Extreme Impacts, Ufa University of Science and Technology; Prof. of the Department of Electrification and Automation of Industrial Production, Polytechnic Institute (branch) of M.K. Ammosov NEFU; Institute for Metals Superplasticity Problems of RAS.