

УДК 004.942

DOI: 10.22213/2410-9304-2024-1-62-68

Компьютерное моделирование процесса синтеза углеродных наноструктур с применением технологий параллельного программирования

А. В. Калач, доктор химических наук, профессор,

Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия

И. С. Толстова, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия

Благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам углеродные наноструктуры привлекают все большее внимание исследователей из различных областей деятельности человека. В статье рассмотрен вопрос использования численных методов решения моделей процессов образования различных наноструктур. Задача моделирования синтеза углеродных наноструктур декомпозирована на шесть подзадач, и проанализировано время, затрачиваемое на их решение. Высказано предположение, что наиболее продуктивной является оптимизация алгоритма расчета параметров электромагнитного поля, поскольку на решение данной подзадачи затрачивается наибольшее машинное время. Показано, что современные математические модели, применяемые для описания процесса синтеза углеродных наноструктур, характеризуются высокой размерностью, вследствие чего возникают проблемы при вычислении параметров моделей. Причем результат низкой эффективности вычислений сильнее проявляется, если использовать для расчета параллельный подход, так как вычислительные потоки приходится периодически останавливать для выявления достижения условия останова. Предположено использование распределенных параллельных структур, которые позволят обеспечить распараллеливание вычислительных процессов в распределенной вычислительной среде. Для решения данной задачи использован метод параллельного программирования. Предложен алгоритм параллельных вычислений и его реализация в виде набора сценариев на языке Python, выполняющих нахождение численных значений потенциала куба плазмы заданной размерности за определенное число итераций. Использование предлагаемого подхода оптимизации процесса вычислений применимо для случая метода крупных частиц, его определяет последовательное использование эйлерового и лагранжевого подходов, что и позволяет осуществлять распараллеливание алгоритма. Предлагаемая техника распараллеливания может быть использована при переходе из узлов расчетной сетки ко взаимодействию расчетных крупных частиц, также применима для решения задач по методу частиц в ячейках Харлоу.

Ключевые слова: наноструктуры, плазма, моделирование, численные методы, параллельные алгоритмы, конвейеризация, распределенные вычисления.

Введение

Углеродные нанотрубки представляют собой материалы с уникальными физико-химическими свойствами (электропроводность, термостойкость, механическая прочность, развитая удельная поверхность), благодаря которым используются в различных областях и сферах деятельности человека (сельское хозяйство, пищевая промышленность, энергетика, медицина и т. д.). Следует отметить, что в последнее время в мире наблюдается значительный рост исследований по синтезу углеродных наноструктур (УНС). При этом главной проблемой остается чрезвычайно высокая стоимость такого синтеза, что зачастую применение УНС делает экономически малоцелесообразным. Следует отметить, что на сегодняшний день углеродные наноструктуры обстоятельно исследованы на предмет их применения в различных областях промышленности.

Требования к физическим характеристикам уникальны для каждой области. Поскольку физические и химические свойства фуллеренов и нанотрубок резко отличаются друг от друга и рассматриваются как отдельные классы, то необходимо модифицировать современные способы для получения структур с заданными параметрами. Стоимость современных технологий синтеза высока, что сдерживает рост промышленного производства. Кроме того, следует отметить, что до сих пор особенности процессов

формирования фуллеренов, нанотрубок не до конца изучены [1, 2].

В настоящее время нет единого мнения о модели ассоциации атомов углерода в кластеры с последующим формированием различных объемных наноструктур. Знание механизмов и условий образования УНС позволит исследователям целенаправленно создавать и варьировать способами и условиями получения различных заданных типов наноструктур. Один из современных методов синтеза УНС – метод термического распыления графита в плазме дугового разряда, который также называют методом плазменной дуги, отличается быстротечностью, в связи с этим усложняются эмпирические исследования, и именно поэтому актуально применять математическое и компьютерное моделирование для изучения процесса формирования УНС [3, 4].

Однако математические модели, применяемые для описания процесса, обладают высокой размерностью, поэтому возникают проблемы при вычислении параметров моделей. Поэтому представляется целесообразной разработка цифрового прототипа производственного процесса синтеза УНС в виде набора математических моделей. Причем для решения данной задачи целесообразно применять методы параллельного программирования [5–9].

Цель исследования – моделирование процесса синтеза углеродных наноструктур с применением технологий параллельного программирования.

Материалы и методы

Рассматривается метод электродугового разряда, который также называют методом плазменной дуги для синтеза УНС. Способ считается исторически первым, который позволил получить нанотрубки. Данный метод, по сути, представляет общее направление идеи, которая на практике может реализовываться большим числом способов. Процесс является многостадийным, малотоннажным и опасным. Кроме того, для производства используется достаточно дорогое сырье. При ошибочно выставленных параметрах синтеза графитовые стержни могут быть вовсе разрушены. Поэтому целесообразно разработать цифровой прототип производственного процесса в виде набора математических моделей.

УНС синтезируются с помощью дуги между электродами. Прекурсорами для них является материал испаряемого анода, легируемого металлическими катализаторами. Когда электроды соприкасаются друг с другом в этих условиях, возникает электрическая дуга. Энергия, произведенная в дуге, передается аноду, который ионизирует атомы углерода чистого графитового анода и производит C^+ ионы и образует плазму. Эти положительно заряженные ионы углерода движутся к катоду, восстанавливаются, осаждаются и растут в виде УНТ на катоде. Полученные УНТ дополнительно очищаются для получения чистой формы УНТ.

Принципиальная схема установки приведена на рис. 1.

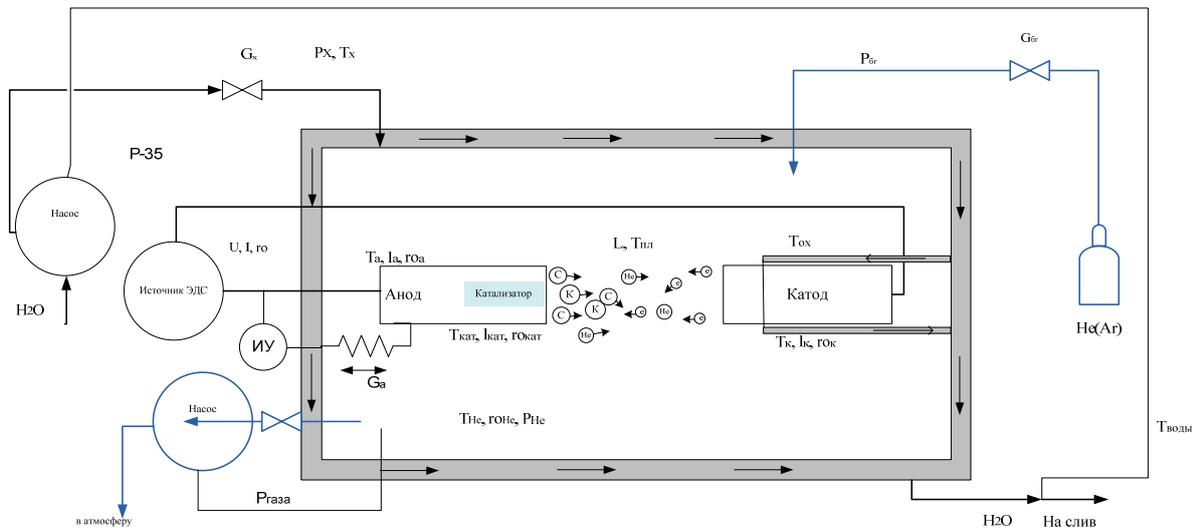


Рис. 1. Схема установки плазменного синтеза УНС

Fig. 1. Diagram of the installation for plasma synthesis of carbon nanostructures

Решение проблемы моделирования процессов образования и роста кластерных групп углерода, формирующих различные наноструктуры с использованием численных методов решения, ориентированных на параллельные вычисления, является актуальной задачей, позволяющей создать высокоэффективные инженерные методики расчета основных параметров процесса. Данное решение позволит получать УНС с заданными качественными и количественными параметрами в промышленных масштабах.

Следует отметить, что практический интерес представляют математические методы и алгоритмы, разработанные для параллельных вычислений в распределенной вычислительной среде численного решения сложных задач с очень большим

объемом вычислений, решение которых возможно с использованием суперкомпьютеров. Данный подход, как правило, недоступен для широкой категории исследователей.

В работе предполагается использовать распределенные параллельные структуры, которые позволят выработать рекомендации по распараллеливанию вычислительных процессов в распределенной вычислительной среде.

Разработанные подходы и алгоритмы можно будет использовать при моделировании сложных производственных процессов с обработкой больших объемов данных.

Процессе плазменного синтеза возможно представить в виде структурно-функциональной модели, включающей блоки, представленные на рис. 2.

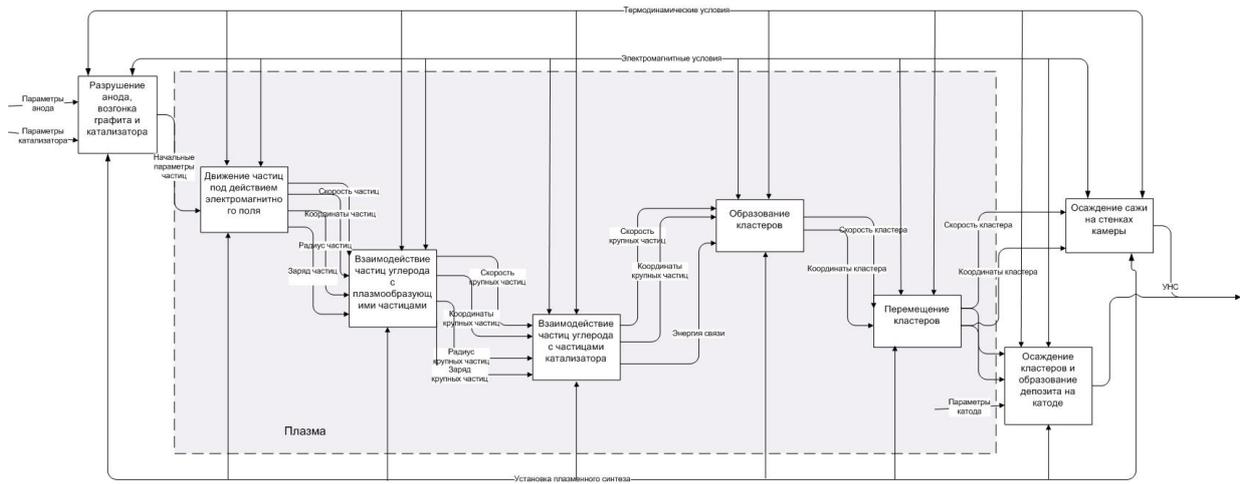


Рис. 2. Структурно-функциональная модель процесса плазменного синтеза УНС

Fig. 2. Structural-functional model of the process of plasma synthesis of carbon nanostructures

Как известно, на процесс плазменного синтеза оказывают влияние термодинамические условия, электромагнитное поле, энергетические условия взаимодействия плазмообразующих частиц. Зависимость этапов получения УНС от параметров окружающей среды приведена на рис. 3.

В основу математической модели, описывающей перемещение и взаимодействие частиц в плазме, положен подход, предложенный в Воронежском государственном университете группой профессора Г. В. Абрамова [10].

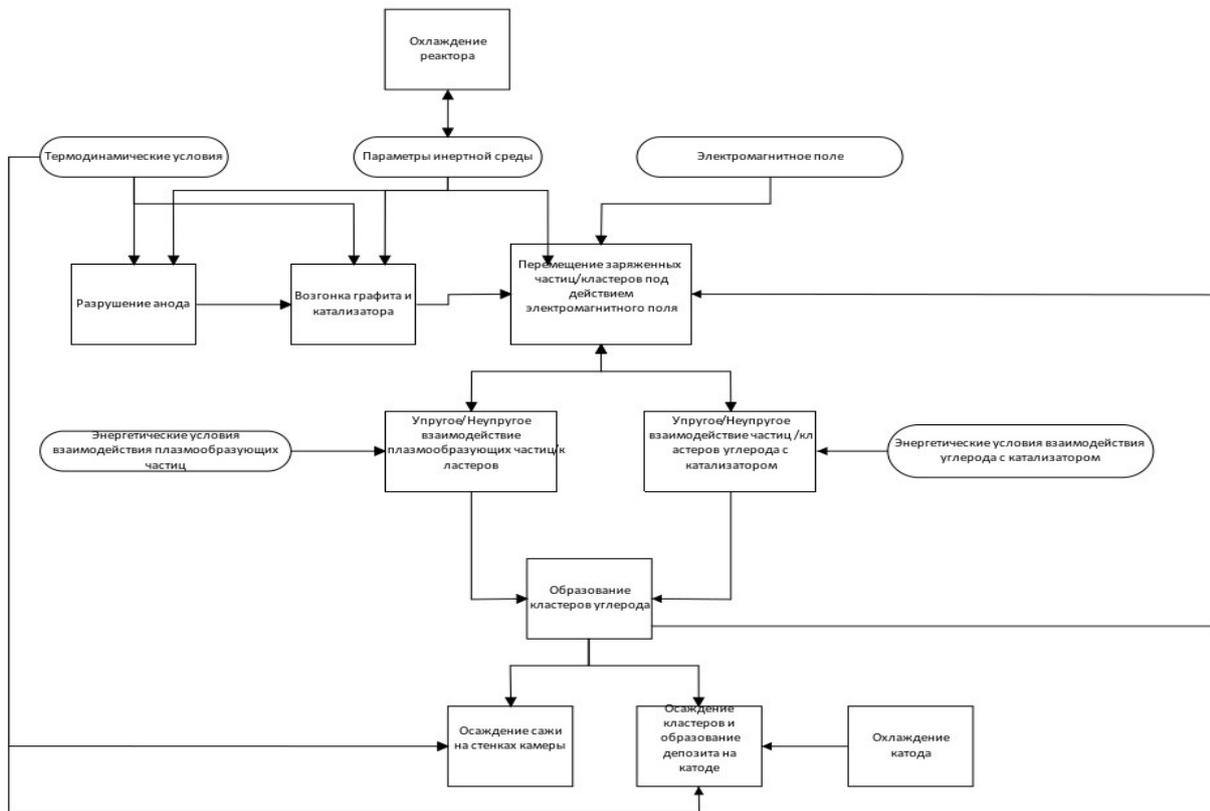


Рис. 3. Зависимость этапов получения УНС от параметров окружающей среды

Fig. 3. Dependence of the stages of obtaining carbon nanostructures on environmental parameters

Данный кинетический подход основан на базе уравнений Больцмана, описывающих каждый вид частиц в плазме (электроны, ионы углерода, буферного газа) и дополненных условиями упругих и

неупругих парных столкновений между частицами. Использование в данном подходе функций распределения различных компонентов плазмы позволяет на основе вероятностного подхода спрогнозировать

поведение частиц углерода в процессе синтеза за счет рассмотрения коллективных явлений плазмы: колебания плазмы, флуктуации различных характеристик, концентрации и потоков частиц. Для нахождения параметров электромагнитного поля данные уравнений Больцмана дополняется системой уравнений Максвелла, описывающей самосогласованное электрическое поле.

Наличие в уравнениях Больцмана интеграла столкновений существенно затрудняет решение предложенной сложной итоговой системы уравнений. Поэтому систему исходных уравнений на осно-

ве кинетического уравнения Больцмана с учетом интеграла столкновений планируется с помощью модификации метода расщепления разбить на две вспомогательных задачи: одна определяет перенос частиц, вторая их столкновение.

При решении задачи моделирования кинетики вероятностного взаимодействия частиц многокомпонентной плазмы в инертном газе с использованием катализатора применялся метод крупных частиц (МКЧ) [11, 12]. В качестве примера на рис. 4 представлены особенности реализации МКЧ в виде диаграммы потоков данных.

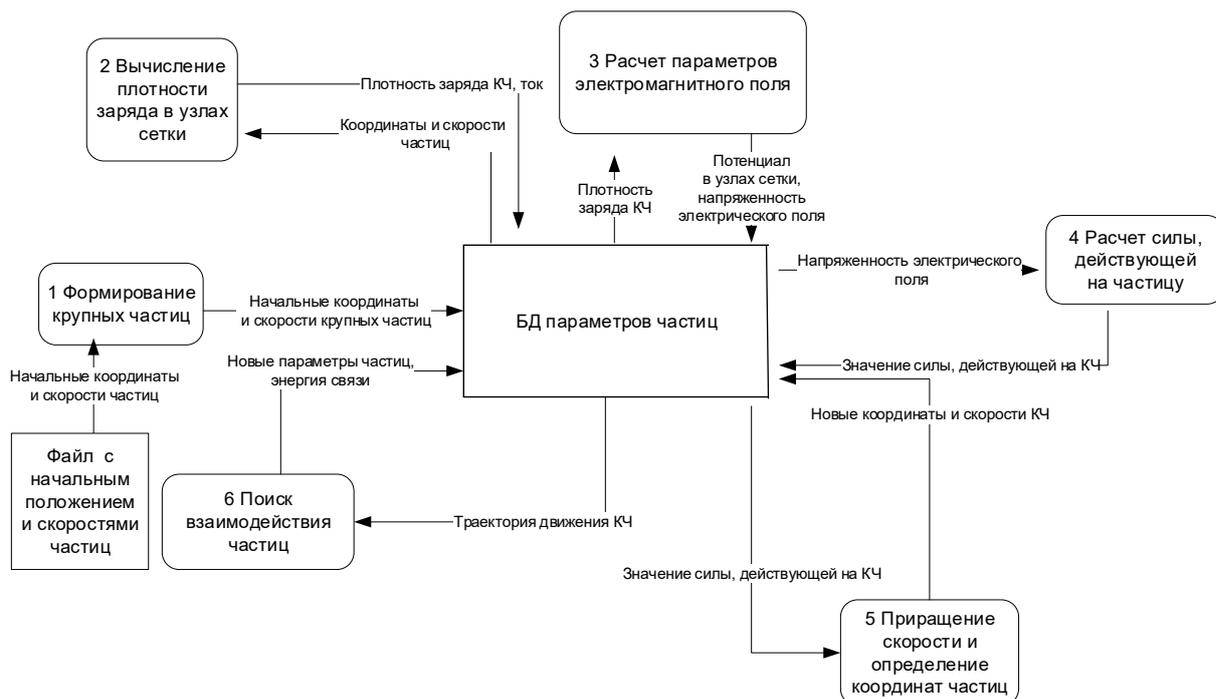


Рис. 4. Диаграмма потоков данных для реализации метода крупных частиц

Fig. 4. Data flow diagram for implementing the coarse particle method

Процесс моделирования движения частиц продолжается, пока не закончится время моделирования. На каждом этапе участвует порядка 10^{10} крупных частиц. В ходе выполнения эксперимента осуществили анализ особенностей распределения процессорного времени, затрачиваемого на решение рассматриваемых задач модели. По результатам экспериментов были установлены наиболее ресурсоемкие элементы модели: генерация начального распределения крупных частиц, расчет параметров электромагнитного поля методом установления и поиск взаимодействия частиц.

В основе метода повышения эффективности вычислительного процесса лежит параллельная обработка принципиально разнородных массивов данных. База данных параметров частиц содержит информацию о скорости заряженных частиц; электромагнитном поле; координатах частиц плазмы и других.

Таким образом, сложность программной реализации алгоритма обуславливается как дискретной решеткой, представляющей часть трехмерного про-

странства, так и отсутствием однозначных путей упорядочивания обращений к памяти, что в свою очередь нарушает принцип локализованности взаимодействия. Таким образом, возможно утверждать, что решение поставленной задачи на основе общепринятых вычислений на многопоточных процессорах не представляется возможным.

Результаты и обсуждение

Установлено, что основное время численного расчета модели занимает решение задачи «Расчет параметров электромагнитного поля».

Данная задача имеет большое количество изменяемых входных аргументов, что делает подход подготовительного расчета несостоятельным. Следует отметить, что одним из способов снижения общего времени расчета рассматриваемой трудоемкой вычислительной задачи является организация конвейеризации и параллелизма [13–16].

Рассмотрим применение принципов параллелизма при расчете потенциала и электромагнитного поля. Присутствующие блоки последовательной рабо-

ты алгоритма представляют собой блоки со слабой вычислительной сложностью, а именно:

- задание начальных условий в виде размерности поля, скорости и времени исследования;
- определение граничных условий;
- заполнение специфических расчетных значений и констант;
- заполнение массивов начальных данных;
- распределение задач по вычислительным модулям.

При реализации параллельного алгоритма можно однозначно говорить о повышении скорости расчета и увеличении его точности.

Каждая итерация процесса моделирования должна сопровождаться получением характеристик поля, в котором происходит движение частиц. Вычисление поля – краевая задача. В рассмотренном алгоритме используется метод установления, который трактует решение краевой задачи как равновесное состояние, к которому приближается решение некоторой нестационарной задачи.

В соответствии с данным методом необходимо построить разностную схему для задачи. Вначале задается разностная сетка с соответствующими параметрами – шагами по пространству и времени.

Далее производится процесс установления, т. е. итеративного вычисления в соответствии с заданной схемой. Завершается он по условию непревышения некоторого малого значения при переходе к следующей итерации, поэтому заранее сообщить количество итераций не представляется возможным.

Использование метода установления позволяет удобнее искать решение исходной краевой задачи, однако малоэффективно с вычислительной точки зрения. Эффект низкой эффективности сильнее проявляется, если использовать для расчета параллельный подход, так как вычислительные потоки приходится периодически останавливать для выявления достижения условия останова.

Поэтому идея оптимизации такова, поскольку расчет эквипотенциальных поверхностей проводить следует на каждом временном шаге моделирования процесса, то первый раз его проводим со случайным (нулевым) начальным условием. Однако полученное решение в дальнейшем запоминается и используется как начальное условие для следующего раза вычисления поля, затем подход повторяется.

Архитектура реализуемого вычислительного кластера для расчета полей представляет собой объединение доступных однопроцессорных многоядерных вычислительных машин посредством локальных вычислительных сетей с маршрутизацией. Каждый вычислительный узел работает под своей копией операционной системы, которая может относиться к Unix-подобным, Windows и Mac. Причем в рамках одного кластера могут находиться все из вышеприведенных типов операционных систем.

В результате разработки программы получили набор сценариев на языке Python, выполняющих на-

хождение численных значений потенциала куба плазмы заданной размерности за определенное число итераций (приближений) с заданной точностью.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сформулировать следующие выводы. Предлагаемые мероприятия по оптимизации вычислений могут быть использованы в рамках уже существующей кодовой базы, для этого выделенные шаги необходимо оформить в виде асинхронных участков исполнения, читающих свои очереди.

Кроме того, исходя из параметра среднего времени пребывания в очереди, можно сделать предположение, что наиболее продуктивным является оптимизация алгоритма расчета параметров электромагнитного поля. Установлено, что данный шаг выполнения расчета, является не только самым длинным, но и блокирующим выполнение других продолжительных шагов в расчетах.

Сделан вывод о том, что использование данного подхода оптимизации процесса вычислений применимо для случая метода крупных частиц, его определяет последовательное использование эйлерового и лагранжевого подходов, что и позволяет осуществлять распараллеливание алгоритма.

Следует отметить, что предлагаемый подход к распараллеливанию расчетов может быть использован при переходе из узлов расчетной сетки ко взаимодействию расчетных крупных частиц. Кроме того, такого рода оптимизация применима, например, и для решения задач по методу частиц в ячейках Харлоу.

Библиографические ссылки

1. Биполярный вариант плазмоэлектрохимического синтеза углеродных наноструктур, декорированных MNOx / В. К. Кочергин, Р. А. Манжос, А. С. Коткин, А. Г. Кривенко // Химия высоких энергий. 2020. Т. 54, № 3. С. 245–250.
2. Заритовский А. Н., Котенко Е. Н. Изучение параметров синтеза углеродных наноструктур в дуговом разряде // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. 2019. № 7 (25). С. 180–184.
3. Формирование кластерных групп углерода в плазме образующих объемные структуры при термическом разрушении графита / Г. В. Абрамов, А. Н. Гаврилов, И. С. Толстова, А. Л. Ивашин // Российские нанотехнологии. 2017. Т. 12, № 3-4. С. 22–26.
4. Abramov G. V., Gavrilov A. N. Modeling of carbon nanostructures synthesis in low-temperature plasma // Advanced Materials and Technologies. 2019. № 1. С. 21-34. DOI 10.17277/amt.2019.01. Pp. 021-034.
5. Schwiegelshohn U., Badia R.M., Bubak M., Danelutto M., Dustdar S., Gagliardi F., Geiger A., Hluchy L., Kranzlmüller D., Laure E., Priol T., Reinefeld A., Resch M., Reuter A., Rienhoff O., Rüter T., Sloot P., Talia D., Ullmann K., Yahyapour R., von Voigt G. Perspectives on grid computing // Future Generation Computer Systems. 2010. V.26. P. 1104-1115. DOI 10.1016/j.future.2010.05.010.
6. Ежова Н. А., Соколинский Л. Б. Обзор моделей параллельных вычислений // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2019. Т. 8. № 3. С. 58–91.

7. Konopka K., Milkowska-Piszczek K., Trebacz L., Falkus J. Improving efficiency of ccs numerical simulations through use of parallel processing // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015. V. 60 (1). P. 235-238. DOI 10.1515/amm-2015-0037.

8. Семенистый В. В., Гамолina И. Э. Сравнительный анализ эффективности параллельных вычислений по явным и неявным разностным схемам для задач вычислительной аэродинамики // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2022. № 5 (229). С. 181–189.

9. Эффективность организации параллельных вычислений высокопроизводительных вычислительных систем / А. Ф. Уласень, С. А. Скачков, С. Х. Экшембиев, Г. Б. Рыжов // *Научные технологии*. 2019. Т. 20, № 1. С. 76–80.

10. Абрамов Г. В., Гаврилов А. Н., Ивашин А. Л. Использование параллельных вычислений в ресурсоемких задачах моделирования процессов движения и взаимодействия частиц в плазме при синтезе углеродных наноструктур // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки*. 2018. № 5 (80). С. 4–14. DOI 10.18698/1812-3368-2018-5-4-14.

11. Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М. Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент. М.: Физматгиз, 1982. 392 с.

12. Воеводин В. В., Воеводин Вл. В. Параллельные вычисления. СПб.: БХВ-Петербург, 2002. 608 с.

13. Антонов А. С. Введение в параллельные вычисления. М.: Изд-во МГУ, 2002. 69 с.

14. Повышение эффективности алгоритма Дейкстры с помощью технологий параллельных вычислений с библиотекой OPENMP / А. А. Аль-Саиди, И. О. Темкин, В. И. Алтай, А. Ф. Алмунтафеки, А. Н. Мохмедхуссин // *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 8 (104). С. 90–105.

15. Kostrov B.V., Grinchenko N.N., Vyugina A.A., Baranova S.N. Parallel computations in problems of reconstruction of distorted images in spatial-spectral form // *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2023. Т. 35. № 2. С. 157-168.

16. Эффективность многопоточных вычислений в системах компьютерного моделирования литейных процессов / В. Е. Баженов, А. В. Колтыгин, А. А. Никитина, В. Д. Белов, Е. А. Лазарев // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2023. Т. 29, № 3. С. 38–53. DOI 10.17073/0021-3438-2023-3-38-53.

References

1. Kochergin V.K., Manzhos R.A., Kotkin A.S., Krivenko A.G. [Bipolar version of plasma-electrochemical synthesis of carbon nanostructures decorated with MnOx]. *Khimiya vysokikh energii*. 2020. Vol. 54, no. 3. Pp. 245-250 (in Russ.).

2. Zaritovskiy A.N., Kotenko E.N. [Studying the parameters of the synthesis of carbon nanostructures in an arc discharge]. *Vestnik Luganskogo natsional'nogo universiteta imeni Vladimira Dalaya*. 2019. No. 7. Pp. 180-184 (in Russ.).

3. Abramov, G.V., Gavrilov A.N., Tolstova I.S., Ivashin A.L. [Formation of carbon cluster groups in plasma forming volumetric structures during thermal destruction of graphite]. *Rossiiskie nanotekhnologii*. 2017. Vol. 12, no. 3-4. Pp. 22-26 (in Russ.).

4. Abramov G.V., Gavrilov A.N. Modeling of carbon nanostructures synthesis in low-temperature plasma. *Advanced*

Materials and Technologies. 2019. No. 1. P. 21-34. DOI 10.17277/amt.2019.01. Pp.021-034.

5. Schwiegelshohn U., Badia R.M., Bubak M., Danelutto M., Dustdar S., Gagliardi F., Geiger A., Hluchy L., Kranzlmüller D., Laure E., Priol T., Reinefeld A., Resch M., Reuter A., Rienhoff O., Rüter T., Sloot P., Talia D., Ullmann K., Yahyapour R., von Voigt G. Perspectives on grid computing. *Future Generation Computer Systems*. 2010. V.26. P. 1104-1115. DOI 10.1016/j.future.2010.05.010.

6. Ezhova N.A., Sokolinsky L.B. [Review of parallel computing models]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika*. 2019. Vol. 8, no. 3. Pp. 58-91 (in Russ.).

7. Konopka K., Milkowska-Piszczek K., Trebacz L., Falkus J. Improving efficiency of ccs numerical simulations through use of parallel processing. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015. V.60(1). P. 235-238. DOI 10.1515/amm-2015-0037.

8. Semenisty V.V., Gamolina I.E. [Comparative analysis of the efficiency of parallel calculations using explicit and implicit difference schemes for problems of computational aerodynamics]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*. 2022. No. 5. Pp. 181-189 (in Russ.).

9. Ulasen A.F., Skachkov S.A., Ekshembiev S.Kh., Ryzhov G.B. [Efficiency of organizing parallel computing of high-performance computing systems]. *Nauchnye tekhnologii*. 2019. Vol. 20, no. 1. Pp. 76-80.

10. Abramov G.V., Gavrilov A.N., Ivashin A.L. [The use of parallel computing in resource-intensive problems of modeling the processes of motion and interaction of particles in plasma during the synthesis of carbon nanostructures]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya Estestvennye nauki*. 2018. No. 5. Pp. 4-14 (in Russ.). DOI 10.18698/1812-3368-2018-5-4-14.

11. Belotserkovskiy O.M., Davydov Yu.M. *Metod krupnykh chastits v gazovoi dinamike. Vychislitel'nyi eksperiment* [Large particle method in gas dynamics. Computational experiment]. Moscow: Fizmatgiz, 1982. 392 p. (in Russ.).

12. Voevodin V.V., Voevodin V.I. *Parallel'nye vychisleniya* [Parallel computing]. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2002. 608 p. (in Russ.).

13. Antonov A.S. *Vvedenie v parallel'nye vychisleniya* [Introduction to parallel computing]. Moscow: Moscow State University Publishing House, 2002. 69 p. (in Russ.).

14. Al-Saidi A.A., Temkin I.O., Altai V.I., Almuntafeki A.F., Mokhmedhussin A.N. [Increasing the efficiency of Dijkstra's algorithm using parallel computing technologies with the OPENMP library]. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2023. No. 8 (104). Pp. 90-105 (in Russ.).

15. Kostrov B.V., Grinchenko N.N., Vyugina A.A., Baranova S.N. Parallel computations in problems of reconstruction of distorted images in spatial-spectral form. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2023. V. 35. No. 2. P. 157-168.

16. Bazhenov V.E., Koltygin A.V., Nikitina A.A., Belov V.D., Lazarev E.A. [Efficiency of multi-threaded computing in systems for computer modeling of foundry processes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya*. 2023. Vol. 29, no. 3. Pp. 38-53 (in Russ.). DOI 10.17073/0021-3438-2023-3-38-53.

Computer Simulation of Carbon Nanostructure Synthesis Applying Multiprogramming Technologies

A. V. Kalach, Doctor of Chemistry, Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia
I. S. Tolstova, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia

Carbon nanostructures attract an increasing attention among researchers in various spheres due to their unique physical and chemical properties. The article considers the application of numerical methods to find solutions of different nanostructure formation models. Modelling problem of carbon nanostructure synthesis is decomposed into six subproblems and time taken to their solution has been analyzed. An assumption was made that the most effective optimization is that of electromagnetic field parameter analysis algorithm as this subproblem requires the least time to solve. It was shown that modern mathematical models applied for carbon nanostructure synthesis description are characterized by high dimensions causing difficulties in calculation of model parameters. The results with low computational efficiency are more evident in case of parallel approach as computation flows have to be stopped from time to time to determine the stopping condition meeting.

The implementation of distributed parallel structures is assumed to provide parallelizing of computational processes within distributed computational environment. To solve the present problem method of multiprogramming has been applied. The algorithm of parallel computation and its implementation in the form of set of scenarios written on Python finding plasma cube potential numerical value of the prescribed dimensions via certain iterations was suggested. The suggested approach of computation optimizing can be implemented in case of large-particle method that combines serial application of Euler and Lagrange approaches providing algorithm parallelizing. The assumed parallelizing technique can also be applied both to move from computational mesh nodes to the interaction between large computational particles and to solve Harlow particle-in-cell method.

Keywords: nanostructures, plasma, simulation, numerical methods, parallel algorithms, pipelining, distributed calculations.

Получено: 05.01.24

Образец цитирования

Калач А. В., Толстова И. С. Компьютерное моделирование процесса синтеза углеродных наноструктур с применением технологий параллельного программирования // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. Т. 22, № 1. С. 62–68. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-1-62-68.

For Citation

Kalach A.V., Tolstova I.S. [Computer Simulation of Carbon Nanostructure Synthesis Applying Multiprogramming Technologies]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 62-68. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-1-62-68.