УДК 519.6:004.94
DOI: 10.26102/2310-6018/2026.61.10.013

Адаптация классических алгоритмов для параллельных вычислительных систем на примере моделирования динамики заряженных частиц в плазме

И.А. Матыцина[1]✉, Л.А. Коробова[2], С.Н. Черняева[3], А.В. Калач[1], Ю.Н. Золотарев[1]

[1]Воронежский институт ФСИН России, Воронеж, Российская Федерация
[2]Компания «Технопарк-В», Воронеж, Российская Федерация
[3]Воронежский филиал «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», Воронеж, Российская Федерация

Резюме. В работе рассматриваются основные аспекты применения некоторых последовательных схем при решении задач физики плазмы. Цель работы – разработка методологии выделения параллельных структур в последовательных численных схемах и внедрение этой методологии в вычислительный кластер. Данное исследование носит прикладной характер и направлено на решение практической задачи. Численные схемы приспособлены к современным вычислительным системам. Исторически первые электронные вычислительные машины работали в последовательном режиме. Достоинством используемых численных схем является возможность декомпозиции с последующей интеграцией параллельных вычислений. С увеличением сложности решаемых задач возникла необходимость в эффективном использовании параллельных архитектур. Авторы анализируют концепцию «внутреннего параллелизма» в численных схемах решения задач высокой сложности. Такой подход позволяет реализовывать алгоритмы на основе уже существующих численных схем. В данной статье показан пример использования при моделировании параметров плазмы метода крупных частиц. Численная схема данного метода позволяет продемонстрировать, как исследование структуры разработанного алгоритма, построение его графа и анализ вычислительной устойчивости дают возможность для распараллеливания вычислений. Приведено математическое описание задачи и схема алгоритма решения. Подробно описаны этапы построения модели. Проведена декомпозиция решения задачи, распределение вычислений по кластерам и анализ устойчивости структур. Алгоритм лег в основу разработанного прототипа программного обеспечения расчета основных параметров модели. Программное приложение позволило решать прикладные практические задачи от общего к частному, т. е., разрабатывать вычислительные системы от полного цикла функционирования к разработке прикладных приложений.

Ключевые слова: внутренний параллелизм, последовательные численные схемы, методология распараллеливания, вычислительный кластер, метод крупных частиц, моделирование динамики плазмы.

Для цитирования: Матыцина И.А., Коробова Л.А., Черняева С.Н., Калач А.В., Золотарев Ю.Н. Адаптация классических алгоритмов для параллельных вычислительных систем на примере моделирования динамики заряженных частиц в плазме. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2026;14(10). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/article?id=2616 DOI: 10.26102/2310-6018/2026.61.10.013

Adaptation of classical algorithms for parallel computing systems using the example of modeling the dynamics of charged particles in plasma

I.A. Matytsina[1]✉, L.A. Korobova[2], S.N. Chernyaeva[3], A.V. Kalach[1], Yu.N. Zolotarev[1]

© Матыцина И.А., Коробова Л.А., Черняева С.Н., Калач А.В., Золотарев Ю.Н., 2026

[1]*Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, the Russian Federation*
[2]*Technopark-V Company, Voronezh, the Russian Federation*
[3]*Voronezh Branch of the Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Voronezh, the Russian Federation*

Abstract. This paper examines the key aspects of using some sequential schemes to solve plasma physics problems. The objective of the paper is to develop a methodology for identifying parallel structures in sequential numerical schemes and to implement this methodology in a computing cluster. This study is of an applied nature and is aimed at solving a practical problem. The numerical schemes are adapted to modern computing systems. Historically, the first electronic computers operated in sequential mode. The advantage of the numerical schemes used is the possibility of decomposition with subsequent integration of parallel computations. With the increasing complexity of the problems being solved, the need for efficient use of parallel architectures has arisen. The authors analyze the concept of "internal parallelism" in numerical schemes for solving highly complex problems. This approach allows the implementation of algorithms based on existing numerical schemes. This paper shows an example of using the large-particle method in modeling plasma parameters. The numerical model of this method demon-strates how studying the structure of the developed algorithm, constructing its graph, and analyzing its computational stability enables parallel computation. A mathematical description of the problem and a diagram of the solution algorithm are provided. The stages of model construction are described in detail. The solution is decomposed, computations are distributed among clusters, and the stability of the structures is analyzed. The algorithm forms the basis for the developed prototype software for calculating the model's key parameters. The software application enables the solution of practical problems from the general to the specific, i. e., the development of computing systems from the full operational cycle to the development of applications.

Keywords: internal parallelism, sequential numerical schemes, parallelization methodology, computing cluster, large-particle method, plasma dynamics modeling.

For citation: Matytsina I.A., Korobova L.A., Chernyaeva S.N., Kalach A.V., Zolotarev Yu.N. Adaptation of classical algorithms for parallel computing systems using the example of modeling the dynamics of charged particles in plasma. *Modeling, Optimization and Information Technology.* 2026;14(10). (In Russ.). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/article?id=2616 DOI: 10.26102/2310-6018/2026.61.10.013

Введение

В настоящее время решение научных и прикладных задач, связанных с моделированием сложных физических процессов, требует вычислительных ресурсов, которые зачастую выходят за пределы возможностей традиционных последовательных алгоритмов и персональных компьютеров. В качестве примера можно привести моделирование задачи динамики заряженных частиц в плазме, где объём необходимых расчётов особенно велик [1]. В подобных условиях ключевую роль приобретает эффективное применение параллельных и распределённых вычислительных систем.

Большинство исследователей, работающих в предметных областях, не обладают глубокими знаниями в сфере параллельного программирования, архитектуры вычислительных комплексов и анализа алгоритмов [2]. Это приводит к затягиванию сроков решения задач, нерациональному использованию вычислительных мощностей и затрудняет внедрение современных технологий моделирования.

Создание методологии унифицированного подхода к адаптации классических последовательных алгоритмов для параллельной архитектуры является актуальной научной задачей [3, 4]. Это позволит понизить требования к компетентности прикладных специалистов и повысить эффективность вычислений – нет необходимости разрабатывать новые методы. Ключевое место в работе занимает анализ внутреннего

параллелизма существующих алгоритмов, что позволит эффективно применять современные кластерные и распределенные системы для решения актуальных научных и технических задач.

Научная новизна работы состоит в обосновании методологии выявления и применения внутреннего параллелизма классических алгоритмов. Применение этих алгоритмов позволит использовать их эффективно на современных параллельных и распределенных вычислительных платформах. Главная особенность работы заключается в том, что методология позволяет модифицировать известные последовательные алгоритмы к современным технологиям. Это позволит значительно сократить трудозатраты на разработку и внедрение новых решений [5, 6].

Практически все специалисты этой области, работающие с различными средами параллельных вычислений, сталкиваются с одной и той же проблемой – низкой эффективностью использования вычислительных ресурсов. Для успешного применения параллельных компьютеров требуется владение технологиями параллельного программирования, знание методов распараллеливания задач, понимание архитектуры вычислительных систем, а также навыки анализа структур и алгоритмов. Однако эти компетенции, как правило, не входят в базовую подготовку исследователей в предметных областях – таких как химия, биология, физика или медицина.

Применение классических алгоритмов, обладающих внутренним параллелизмом, не только обеспечивает рост производительности вычислений, но и способствует формированию единых подходов к моделированию сложных физических процессов. С точки зрения архитектуры распределённых систем можно выделить вычислительные кластеры и векторно-конвейерные компьютеры. Выбранный тип архитектуры закладывает фундаментальные основы системы, а также методологию решения прикладных задач [7, 8]. В случае кластерных систем основной акцент делается на декомпозицию и распараллеливание ключевых фрагментов алгоритма, тогда как для векторно-конвейерных машин приоритетной становится векторизация внутренних циклов. Указанные принципы оказывают влияние на итоговую производительность. Высокая эффективность решения возможна лишь при грамотном проектировании архитектуры вычислительного процесса.

Материалы и методы

Вычислительные возможности отдельных компьютеров оказываются недостаточными для решения задач, связанных с обработкой больших объёмов данных и сложными расчётами. ЭВМ, на которых работают научные сотрудники. Они не обеспечивают необходимую производительность вычислений. Это связано с архитектурой персонального компьютера, ориентированной на последовательное выполнение операций [9].

Решение этой проблемы обусловило появление нового направления в развитии вычислительных технологий. Необходимо количественное наращивание мощности с помощью объединения множества компьютеров в одну целую систему, а не улучшение качественных характеристик отдельных компонентов системы. Это позволит генерировать вычислительные кластеры, которые будут работать подобно единому модулю. Это даст возможность увеличить производительность, не повышая стоимость отдельных узлов, а также без усложнения всей системы.

С эволюцией распределенных систем стало понятно, что классическими способами алгоритмы уже не спроектируешь, необходимы специфические методы, способные эффективно функционировать в подобной среде [3, 10].

Наиболее распространённой технологией для организации распределённых вычислений является стандарт MPI (Message Passing Interface), который признан де-факто интерфейсом взаимодействия между узлами распределённой системы [11]. Существует множество свободных и коммерческих реализаций MPI, обеспечивающих переносимость и универсальность разработки программного обеспечения для суперкомпьютеров и кластеров. Стандартизацией API занимается MPI Forum, а сами реализации доступны для таких языков, как Java, Fortran, Python, C, C++ и C#. Среди наиболее известных реализаций выделяются OpenMPI и MPIch.

OpenMP представляет собой расширение, ориентированное на работу с общей памятью, тогда как классический MPI предназначен для систем с распределённой памятью. Обе технологии способны функционировать с различными типами памяти, а их совместное применение позволяет повысить производительность распределённых систем. Межсервисная коммуникация происходит благодаря приему и передаче сообщений [12].

Чтобы правильно обрабатывать данные в MPI предусмотрены механизмы для блокировки операций передачи и приёма, включая как блокирующие, так и неблокирующие вызовы. В последнем случае предусмотрен контроль состояния сообщения (готовность или ожидание данных) [13].

Иной подход заключается в механизме RMA (Remote Memory Access). Он позволяет напрямую вносить корректировки значений в памяти удалённого процесса. Такой подход обеспечивает более высокую производительность за счёт снижения уровня контроля, однако требует использования функций синхронизации для управления процессами [3]. Операции RMA являются двунаправленными, что позволяет процессам взаимно изменять области памяти друг друга.

MPIch – одна из первых библиотек, реализующих стандарт MPI. OpenMPI – реализация с открытым исходным кодом, отличающаяся простым интерфейсом, высокой масштабируемостью и поддержкой высокоскоростных сетей (например, Myricom). Благодаря этим качествам данная методология заслуженно занимает лидирующие позиции в мировой практике высокопроизводительных вычислений [14].

Результаты

Математическое описание объекта исследования. Для получения модели приняты следующие допущения и исходные данные.

Частицы распределены в пространстве, положение частиц определяет декартова система координат [10]. Начало системы координат находится на торце анода.

Описание процессов, протекающих в исследуемом объекте, происходит посредством описания функции плотности распределения элементов плазмы.

Функция распределения элементов позволяет моделировать такие явления как колебания плазмы, концентрацию частиц и другие.

На Рисунке 1 представлена декартова сетка. Обозначения, принятые в данном исследовании: $L_x,\ L_y,\ L_z$ – размер сетки по координатам.

Одним из методов численного решения является метод крупных частиц (КЧ). В описании математической модели метод КЧ использует следующие обозначения: $f_e,\ f_c,\ f_h$ – функция распределения для электронов (индекс e), ионов гелия (индекс c), ионов углерода (индекс h); $\vec{E}, \vec{B}$ – вектор напряженности электрического и магнитного поля; ρ – плотность заряда; $\vec{J}$ – плотность тока.

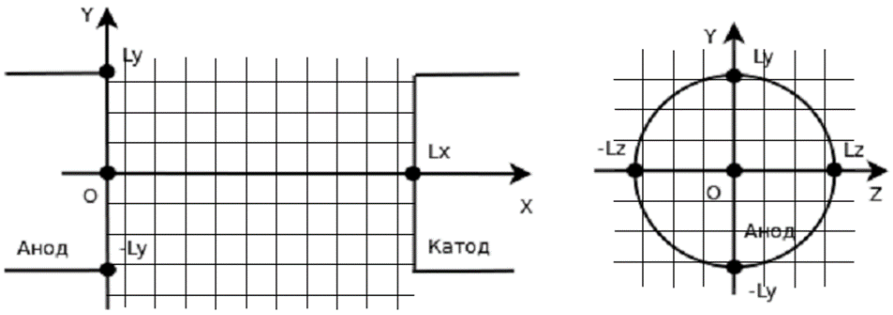

Рисунок 1 – Иллюстрация решения задачи электродугового синтеза
Figure 1 – Illustration of the solution to the problem of electric arc synthesis

Для построения математического описания модели электромагнитного поля плазмы и нахождения функции распределения частиц по методу КЧ необходимо решить уравнение Максвелла. Данное уравнение выражается следующим образом:

$$\nabla\vec{E} = -\Delta\varphi = 4\pi\rho, \tag{1}$$

$$\nabla\vec{B} = \Delta \times \vec{A} = \mu_0\vec{J}. \tag{2}$$

где ρ – плотность заряда, $\vec{J}$ – плотность тока и μ_0 – магнитная постоянная. Первое уравнение выражено в скалярном виде, а второе – в векторном.

Рассмотрим скалярный вид уравнения, так как для проводимых исследований его форма является наиболее подходящей. Представим уравнение (1) в виде дифференциального уравнения второго порядка, используя уравнение Пуассона:

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = -4\pi\rho(x, y, z), \tag{3}$$

$$\phi_{\text{гр}} = \phi_{\text{гр}}(x, y, z), \tag{4}$$

$$0 \le x \le L_x, \quad 0 \le y \le L_y, \quad 0 \le z \le L_z, \tag{5}$$

где L_x, L_y, L_z – размерность сетки из Рисунка 1, ρ – плотность заряда, функция от координат сетки – $\rho(x,\ y,\ z)$.

После преобразования получим конечно-разностный вид уравнения:

$$\frac{\phi_{k+1,j,i} - 2\phi_{k,j,i} + \phi_{k-1,j,i}}{h_x^2} + \frac{\phi_{k,j+1,i} - 2\phi_{k,j,i} + \phi_{k,j-1,i}}{h_y^2} + \frac{\phi_{k,j,i+1} - 2\phi_{k,j,i} + \phi_{k,j,i-1}}{h_z^2} = -4\pi\rho_{k,j,i}, \tag{6}$$

$$\phi_{0,j,i} = \phi_1,\ \phi_{n+1,j,i} = \phi_2,$$

$$\phi_{k,0,i} = \phi_3,\ \phi_{k,m+1,i} = \phi_4,$$

$$\phi_{k,j,0} = \phi_5,\ \phi_{k,j,b+1} = \phi_6,$$

где $k = 0 \dots n,\ j = 0 \dots m,\ i = 0 \dots b$ – нормализованные координаты точек в декартовой системе координат относительно шага, $h_x = \frac{L_x}{n+1}$, $h_y = \frac{L_y}{m+1}$, $h_z = \frac{L_z}{b+1}$ – шаг сетки.

Предполагая, что шаг останется неизменным и одинаковым, перейдем к форме конечно-разностного уравнения вида:

$$\phi_{k+1,j,i} + \phi_{k-1,j,i} + \phi_{k,j+1,i} + \phi_{k,j-1,i} + \phi_{k,j,i+1} + \phi_{k,j,i-1} - 6\phi_{k,j,i} = -4\pi\rho_{k,j,i}h^2. \tag{7}$$

При численном решении будем использовать метод установления. При этом считаем, что уравнение (7) стационарное, т. е. принимаем следующие условия:

– решение уравнения диффузии с коэффициентом, равным единице $\frac{\partial\phi}{\partial t} = \Delta\phi + 4\pi\rho$;

– потенциал не изменяется, т. е. $\frac{\partial\phi}{\partial t} = 0$.

$$\phi_{k,j,i}(t+\Delta t) = \phi_{k,j,i}(t) + \alpha(\phi_{k+1,j,i}(t) + \phi_{k-1,j,i}(t) + \phi_{k,j+1,i}(t) + \phi_{k,j-1,i}(t) + \phi_{k,j,i+1}(t) + \phi_{k,j,i-1}(t) - 6\phi_{k,j,i}(t) + 4\pi\rho_{k,j,i}h^2), \quad (8)$$

где коэффициент определяется в соответствии с шагом сетки $\alpha = \frac{\Delta t}{h^2}$.

Условие установившегося состояния выражается как:

$$\left|\sum_{k,j,i}\phi_{k,j,i}(t+\Delta t) - \sum_{k,j,i}\phi_{k,j,i}(t)\right| \le \varepsilon_0. \quad (9)$$

После расчета потенциалов в точках сетки, рассчитаем значение электрического поля:

$$E_{x_{k,j,i}} = \frac{\phi_{k-1,j,i} - \phi_{k+1,j,i}}{2h_x},\ E_{y_{k,j,i}} = \frac{\phi_{k,j-1,i} - \phi_{k,j+1,i}}{2h_y},\ E_{z_{k,j,i}} = \frac{\phi_{k,j,i-1} - \phi_{k,j,i+1}}{2h_z}. \quad (10)$$

В процессе исследования сформулировано математическое описание задачи, а также алгоритм решения. На основе алгоритма разработано программное обеспечение, которое производит расчеты данной математической модели.

Следующий шаг связан с построением математической модели и описанию алгоритма реализации. Его основная задача выявлять и выделять параллельные структуры в исходном последовательном алгоритме. Принципиальная схема функционирования метода представлена на Рисунке 2, а схема организации расчётов с использованием параллельного алгоритма – на Рисунке 3.

Рисунок 2 – Пример использования метода КЧ к решению задачи электродугового синтеза
Figure 2 – An example of applying the large-particle (PIC) method to solve the electric arc synthesis problem

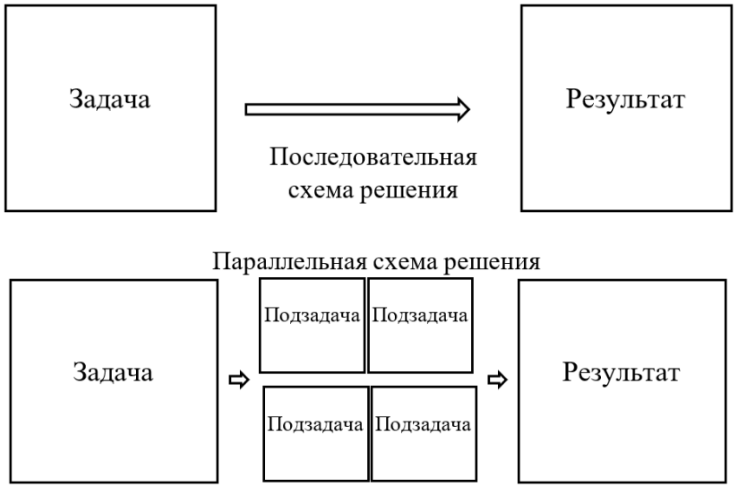

Рисунок 3 – Схемы реализации расчетов алгоритмом
Figure 3 – Computational schemes of the algorithm implementation

Целью научной работы является проведение анализа возможностей распараллеливание представленного алгоритма, уделяя особое внимание применению современных методов параллельных вычислений. Основной пункт параллелизма – разделение исходной задачи на независимые подзадачи. Эти подзадачи распределяются на отдельные вычислительные узлы. На Рисунке 4 представлен пример такого алгоритма.

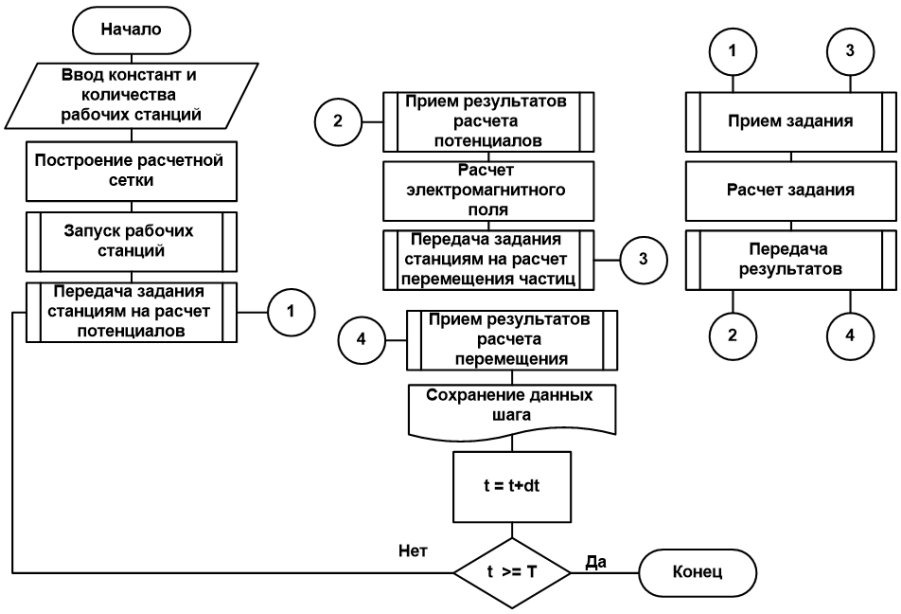

Рисунок 4 – Пример распараллеливания
Figure 4 – Example of parallelization

При рассмотрении Рисунка 4 видно, что высокий параллелизм выявляется при расчете потенциала и электромагнитного поля. А невысокую вычислительную сложность несут последовательные блоки алгоритма: запуск рабочих станций, прием заданий, передача результатов и т. д.

Внедрение параллельного алгоритма обеспечивает существенное увеличение скорости вычислений и способствует росту точности получаемых результатов. Принципиальная схема организации расчётов с применением распределённых вычислительных ресурсов представлена на Рисунках 5 и 6.

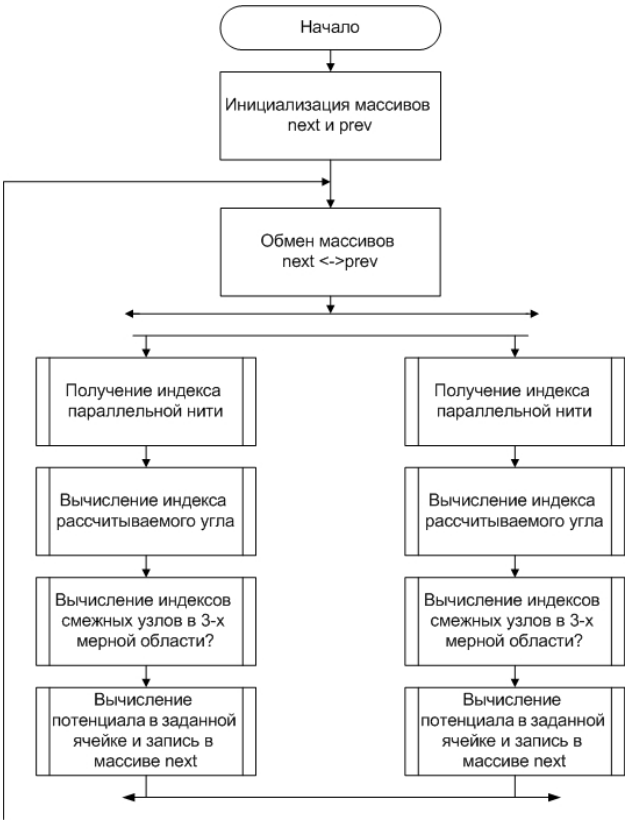

Рисунок 5 – Принципиальная схема работы приложения: начало
Figure 5 – Schematic diagram of the application: start

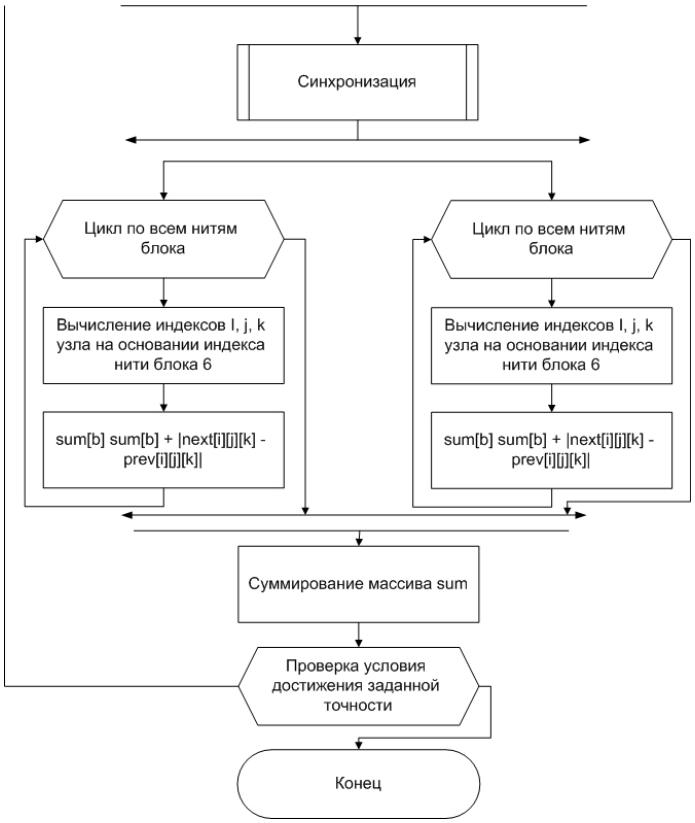

Рисунок 6 – Принципиальная схема работы приложения: окончание
Figure 6 – Schematic diagram of the application operation: end

В рамках проведённого исследования впервые осуществлён подробный анализ этапов декомпозиции задачи моделирования электромагнитного поля в плазме методом крупных частиц. Предложены новые схемы распределения вычислительной нагрузки между узлами кластера, а также выполнен анализ численной устойчивости возникающих параллельных структур. В результате работы удалось подтвердить практическую эффективность предложенного подхода за счет разработанного прототипа программного комплекса, а также развернутого кластера.

Обсуждение

Основной проблемой специалистов, занимающихся прикладными задачами, является ускорение расчетов при большой нагрузке на компьютер. Так как устройства исследователей зачастую не являются суперновыми и быстрыми машинами, они были настроены под строго последовательное выполнение команд. При переходе к задачам высокой размерности, таким как кинетическое моделирование плазмы методом КЧ, традиционный подход демонстрирует предел масштабируемости, так как вычислительная сложность растет пропорционально числу пробных частиц и узлов сетки. Здесь очевидным решением проблемы кажется создание новых алгоритмов под стандарты MPI или OpenMP. Однако необходимо помнить, что специалисты предметных областей не обладают компетенциями в области параллельного программирования. И эти разработки могут затянуть исследования на годы.

В данной научной работе предложен альтернативный подход. Представлена адаптация классических методов за счет выявления внутреннего параллелизма. Анализ показал, что существующие схемы содержат необходимый ресурс для масштабирования. На примере расчета электромагнитного поля продемонстрировано, что вычислительно сложные этапы (нахождение потенциала и напряженности) эффективно разделяются между узлами и кластерами, что демонстрируется на Рисунке 4. В то время как затраты времени на ввод-вывод остаются минимальными.

С технической точки зрения выбор инструментов стандартен, упор сделан на результат. Для систем с распределенной памятью де-факто стандартом остается MPI, а для общей памяти – OpenMP. В работе делается упор конкретно на передачу сообщений между узлами. Были рассмотрены как классические блокирующие вызовы, так и неблокирующие операции, что позволяет процессору не простаивать в ожидании ответа от соседа. Также рассмотрен механизм прямого доступа к удаленной памяти (RMA).

С практической точки зрения применение данного подхода дает возможность оптимизировать рабочий процесс исследовательских групп. Разделение процесса разработки на создание адаптивного системного ядра и последующую реализацию прикладной логики существенно снижает трудоемкость внедрения современных HPC-технологий. Анализ этапов решения задачи, представленный на Рисунке 7, наглядно демонстрирует данный эффект. Сбалансированность конвейерных вычислений практически исключает простои оборудования, которые характерны для монолитных последовательных реализаций.

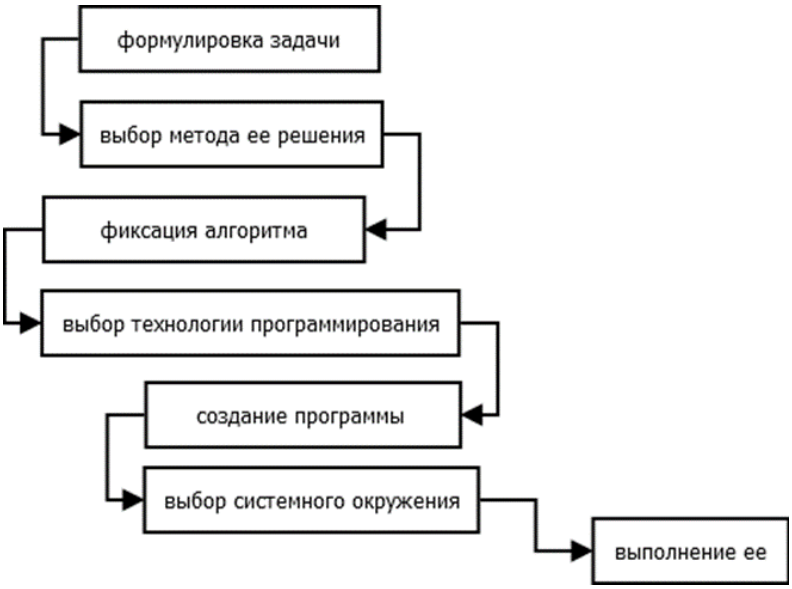

Рисунок 7 – Этапы решения задачи
Figure 7 – Stages of problem solving

Фактически в работе доказано, что полностью отказываться от старых алгоритмов рано. Выяснено, что в них заложен ресурс масштабируемости, главное правильно его извлечь. Это дает возможность ученым из предметных областей применять мощь современных кластеров без изучения основ программирования.

Наиболее эффективным путем развития наукоемких расчетов является разделение труда. Один специалист адаптирует ядро алгоритма, а другой – пишет прикладной интерфейс.

Заключение

В работе представлено решение проблемы переноса классических последовательных алгоритмов на современные параллельные вычислительные платформы. Выявлено, что, если метод изначально направлен на последовательное использование, то в нем есть ресурс, позволяющий применять его в параллельных вычислениях. Этот факт позволяет эффективно применять данные алгоритмы на кластерных и распределенных системах, при этом не создавать новых подходов и систем. Это позволяет сократить временные и трудовые затраты. А самое главное, это позволит ускорить интеграцию современных вычислительных решений в сферу прикладных научных исследований.

Практическая реализация рассмотренного подхода представлена на примере моделирования электромагнитного поля в плазме методом КЧ. Особое внимание уделено алгоритмам декомпозиции задачи, распределению вычислений между узлами кластера и анализу численной устойчивости параллельных структур. Разработанный прототип приложения и развёрнутый вычислительный кластер подтвердили эффективность предложенной методологии на практике.

При переходе от разработки вычислительной системы полного цикла, к разработке только прикладных приложений повышается эффективность труда работников, занятых в наукоемких направлениях. Данная исследовательская работа показала, что на современном этапе реализация раздельной разработки возможна и методологически оправдана.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Толстова И.С. Параллельный алгоритм численного моделирования синтеза углеродных наноструктур. *Вестник Воронежского института ФСИН России*. 2024;(1):125–131.
   Tolstova I.S. Parallel algorithm for numerical simulation of carbon nanostructure synthesis. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii*. 2024;(1):125–131. (In Russ.).
2. Бэдсел Ч., Ленгдон А. *Физика плазмы и численное моделирование.* Москва: Энергоатомиздат; 1989. 452 с.
   Birdsall Ch.K., Langdon A.B. *Plasma physics, via computer simulation.* Moscow: Energoatomizdat; 1989. 452 p. (In Russ.).
3. Москалев В.А., Коробова Л.А. Исследование выбора архитектуры приложения на качество его функционирования. *Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах*. 2025;(4):219–224.
   Moskalov V.A., Korobova L.A. Studying the choice of application architecture to impact functionality. *Information Technologies in Construction, Social and Economic Systems.* 2025;(4):219–224. (In Russ.).
4. Таненбаум Э., Бос Х. *Современные операционные системы*. Санкт-Петербург: Питер; 2019. 1120 с.
   Tanenbaum A.S., Bos H. *Modern Operating Systems*. Saint Petersburg: Piter; 2019. 1120 p. (In Russ.).
5. Берендеев Е.А., Ефимова А.А. Реализация эффективных параллельных вычислений при моделировании больших задач физики плазмы методом частиц в ячейках. *Вестник УГАТУ*. 2013;17(2):112–116.
   Berendeev E.A., Efimova A.A. Implementation of the effective parallel calculations to model large-scale plasma physics problems by the PIC-method. *Vestnik UGATU.* 2013;17(2):112–116. (In Russ.).
6. Филиппов Г.А., Васильева О.А. Численный анализ устойчивости решений дискретных моделей кинетического уравнения в задачах газовой динамики. *Перспективы науки*. 2025;(5):114–118.
   Filippov G.A., Vasilyeva O.A. Numerical analysis of the stability of solutions of discrete models of the kinetic equation in gas dynamics problems. *Science Prospects.* 2025;(5):114–118. (In Russ.).
7. Белевцов Н.С., Лукащук С.Ю. Параллельный алгоритм численного решения дробно-дифференциального обобщения уравнения Пуассона. В сборнике: *Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2019)*: *Короткие статьи и описания плакатов XIII Международной научной конференции, 02–04 апреля 2019 года, Калининград, Россия.* Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ; 2019. С. 165–174.
8. Раад М. Технологии параллельного программного обеспечения при выполнении сложных вычислительных алгоритмов. *Молодой ученый*. 2025;(18):29–32.
   Raad M. Parallel software technologies for executing complex computational algorithms. *Young Scientist*. 2025;(18):29–32. (In Russ.).
9. Бастраков С.И., Гоносков А.А., Донченко Р.В., Ефименко Е.С., Малышев А.С., Мееров И.Б. Исследование и поиск наиболее эффективных подходов к параллельному моделированию плазмы методом частиц в ячейках на кластерных системах. В сборнике: *Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2011): Труды Международной научной конференции, 28 марта – 01 апреля 2011 года, Москва, Россия.* Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ; 2011. С. 411–417.

10. Калач А.В., Толстова И.С. Компьютерное моделирование процесса синтеза углеродных наноструктур с применением технологий параллельного программирования. *Интеллектуальные системы в производстве*. 2024;22(1):62–68. https://doi.org/10.22213/2410-9304-2024-1-62-68
Kalach A.V., Tolstova I.S. Computer simulation of carbon nanostructure synthesis applying multiprogramming technologies. *Intelligent Systems in Production*. 2024;22(1):62–68. (In Russ.). https://doi.org/10.22213/2410-9304-2024-1-62-68
11. Ежова Н.А., Соколинский Л.Б. Исследование масштабируемости итерационных алгоритмов при суперкомпьютерном моделировании физических процессов. *Вычислительные методы и программирование*. 2018;19(4):416–430. https://doi.org/10.26089/NumMet.v19r437
Ezhova N.A., Sokolinsky L.B. Scalability evaluation of iterative algorithms for supercomputer simulation of physical processes. *Numerical Methods and Programming*. 2018;19(4):416–430. (In Russ.). https://doi.org/10.26089/NumMet.v19r437
12. Клименко В.И. Параллельные вычисления и создание параллельных программ. *Научные труды КубГТУ*. 2016;(15):147–154. URL: https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0036/1298.pdf
Klimenko V.I. Parallel calculations and creation of parallel programs. *Scientific Works of KubSTU*. 2016;(15):147–154. (In Russ.). URL: https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0036/1298.pdf
13. Волосова А.В. Параллельные алгоритмы. В сборнике: *ИИАСУ'24 – Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных: Сборник статей III Всероссийской научной конференции: Том 3, 30 октября – 01 ноября 2024 года, Москва, Россия.* Москва: Издательский дом «КДУ»; 2025. С. 66–124.
14. Korobova L.A., Matytsina I.A., Tolstova I.S., Mironova M.S. Prototype mobile application definitions fresh products based on neural network. In: *Journal of Physics: Conference Series: Volume 1902: International Conference "Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics: Current Problems" (AMCSM 2020), 07–09 December 2020, Voronezh, Russia*. IOP Publishing; 2021. Article No. 012118. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1902/1/012118

ИНФОРМАЦИЯОБАВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Матыцина Ирина Александровна, кандидат технических наук, профессор кафедры безопасности информации и защиты сведений, составляющих государственную тайну, Воронежский институт ФСИН России, Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: irina210390@mail.ru
ORCID: 0000-0001-9236-9654

Irina A. Matytsina, Candidate of Engineering Sciences, Professor at the Department of Information Security and Protection of Information Constituting a State Secret, Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, the Russian Federation.

Коробова Людмила Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, инженер-программист, Компания «Технопарк-В», Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: lyudmila_korobova@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1349-732X

Lyudmila A. Korobova, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Software Engineer, Technopark-V Company, Voronezh, the Russian Federation.

Черняева Светлана Николаевна, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой математики, информационных систем и технологий, Воронежский филиал «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: chern_sv@mail.ru
ORCID 0000-0002-5564-9806

Svetlana N. Chernyaeva, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, Head of the Department of Mathematics, Information Systems and Technologies, Voronezh Branch of the Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Voronezh, the Russian Federation.

Калач Андрей Владимирович, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры безопасности информации и защиты сведений, составляющих государственную тайну, Воронежский институт ФСИН России, Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: a_kalach@mail.ru
ORCID: 0000-0002-8926-3151

Andrey V. Kalach, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor at the Department of Information Security and Protection of Information Constituting a State Secret, Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, the Russian Federation.

Золотарев Юрий Николаевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры безопасности информации и защиты сведений, составляющих государственную тайну Воронежский институт ФСИН России, Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: vifsin@36.fsin.gov.ru
ORCID: 0000-0003-0582-3009

Yuri N. Zolotaryov, Doctor of Engineering Sciences, Docent, Professor at the Department of Information Security and Protection of Information Constituting a State Secret, Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 16.08.2026; одобрена после рецензирования 15.10.2026; принята к публикации 22.10.2026.

The article was submitted 16.08.2026; approved after reviewing 15.10.2026; accepted for publication 22.10.2026.