

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1 Групповые явления в жизни животных	8
1.1 Методы наблюдения и сбора информации.....	8
1.2 Основные результаты наблюдений	10
1.3 Количественные характеристики группового движения ...	14
ГЛАВА 2 КОМПЬЮТЕРНЫЕ МОДЕЛИ ГРУППОВОЙ ДИНАМИКИ	17
2.1 Основные модели	17
ГЛАВА 3 АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГРУППОВОЙ ДИНАМИКИ	21
3.1 Классические модели	21
3.1.1 Феноменологические уравнения	21
3.1.2 Больцмановский подход к получению уравнений движения.....	23
3.2 Модель микроскопической фазовой плотности	25
ГЛАВА 4 Численный эксперимент	27
4.1 Задача, поставленная перед численным моделированием ..	27
4.2 Оптимизации, проведенные в программе-симуляторе.....	28
4.2.1 Особенности многопоточной обработки данных	28
4.2.2 GPGPU вычисления	29
4.2.3 Определение равновесного состояния системы	31
4.3 Адаптация граничных условий течения Куэтта	31
4.4 Алгоритм определения стабилизации состояния системы	33
ГЛАВА 5 РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	35
ВЫВОДЫ.....	35
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	38

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ВВЕДЕНИЕ

Считается, что впервые задача моделирования поведения “разумно” взаимодействующих объектов была поставлена и удовлетворительно решена К. Рейнольдсом в 1987 году [1]. Его модель носила исключительно прикладной характер, и использовалась для моделирования поведения стай птиц, групп животных или даже космических кораблей при создании анимационных фильмов.

В природе существует безграничное многообразие взаимодействий между живыми существами. Однако, многолетние наблюдения показали, что все живые организмы, собираясь в группы, демонстрируют особый класс группового взаимодействия, в результате чего было выделено отдельное направление в биологии, изучающее этот феномен.

Параллельно с этим, в 1995 годы Т. Vicsek’ом и коллегами [2] была предложена минимальная модель, описывающаяся простыми уравнениями, и демонстрирующая многие аспекты групповой динамики. Наиболее интересным с физической точки зрения в их модели оказалось наличие явления фазового перехода от разупорядоченного к упорядоченному поведению частиц, называемых “самодвижущимися”.

С тех пор было предложено некоторое количество аналогичных моделей, к примеру [3–8], было проведено множество симуляций с различными параметрами систем (наиболее полную информацию можно найти в одной из последних работ Т. Vicsek’а [9], и в приведенном списке литературы), а также был получен богатый экспериментальный материал, представленный в [10–23], и многих других изданиях.

Однако, несмотря на 20-ти летнюю историю, по прежнему в области описания поведения самодвижущихся частиц остается множество пробе-

лов. К примеру, нет однозначности касательно рода фазового перехода, с аргументами как за первый [3, 24], так и за второй [2, 6, 12] род.

Не менее интересным является вопрос об аналитическом описании жидкости самодвижущихся частиц. До сих пор не было получено не-приближенных уравнений движения. Среди полученных результатов выделяются работы Tonner'a и Tu [8, 25], в которых были получены феноменологические уравнения, аналогичные уравнениям Навье-Стокса, а также работы Bertin'a и соавторов [26], в которых было рассмотрен Больцмановский подход в приближении парного взаимодействия, и получены уравнения, прямо соответствующие феноменологическим.

Недавно был предложен другой подход, основанный на функционале микроскопической фазовой плотности, в результате которого были получены уравнения, не соответствующие феноменологическим в том, что касалось вязкого взаимодействия, в результате чего встал вопрос о существовании вязкости в модели самодвижущихся частиц.

ГЛАВА 1

Групповые явления в жизни животных

Если сто бегунов как один бегут,
 Это можно назвать так и сяк.
 У лошадей это будет табун,
 У рыб это будет косяк.

Машина Времени

1.1 Методы наблюдения и сбора информации

Главная сложность в выполнении экспериментального наблюдения за группой животных или, тем более, насекомых заключается в трудности отслеживания траекторий отдельных особей. Это связано с тем, что рассматриваемые колонии или группы

- состоят из множества индивидов, которые
- выглядят очень похоже
- и в основном очень быстро перемещаются

Кроме того, необходимо учитывать крайнее разнообразие живых организмов, за перемещением которых необходимо наблюдать, поскольку, как уже говорилось во введении, изменение поведения при объединении в группы наблюдается для широкого разнообразия типоразмеров животных — начиная от бактерий в пробирке [10, 13] и заканчивая китами на океанских просторах [27]. Несмотря на совсем неочевидные методы решения этих проблем, изучению стадного поведения (flocking behavior) на протяжении многих лет посвящалось значительное внимание. Можно заметить что особенно остро (хоть и не в такой формулировке) этот вопрос стоял в 20-е годы XIX столетия на территории Одесской области, которая подвергалась массовым нашествиям саранчи, однако без компьютерного оборудования или без достижения теории ренормализационных групп достичь каких-либо результатов было невозможно.

Итак, возвращаясь к теме этого пункта, вкратце рассмотрим используемые сейчас методы регистрации траекторий индивидов в стаде (стае). Условно их можно разделить на две неравные группы: в одну отнесем так или иначе методы с использованием визуальных средства (т.е. фото- и видеокамер, в комбинации с различного рода маячками или метками), а в другую — сравнительно недавно начавшие применяться методы с использованием GPS-систем. И если применение методов из второй группы не вызывает никаких технических вопросов (кроме, очевидно, закрепления такого рода устройств на исследуемых индивидах), то на методах первой группы следует остановиться подробней.

Классическим может считаться метод измерения скорости по изображениям частиц [28]. Обычно он применяется для измерения скорости потока жидкости или газа: в исследуемую среду вводится краситель, состоящий из броуновских частиц, и при помощи наблюдения за перемещением этого вещества возможно определить линии тока в исследуемой среде. Применимо к самодвижущимся частицам метод успешно был применен Czirók уточни и соавторами[13], которые при помощи фазово-контрастной микроскопии пра-исследовали групповое движение молекул. во-

Когда речь заходит об исследовании стай птиц (стад животных), размер птиц индивидов больше, однако, в отличие от бактерий, область перемещения са-слабо ограничена. Тогда движение записывается напрямую на камеру, с тем сла- чтобы в дальнейшем восстановить отдельные траектории. К примеру, в 70-е годы аэрофотосъемка использовалась для определения расположения отдельных индивидов во время сбивания африканских буйволов в стадо [23]. Однако использования одной камеры для фиксирования перемещений группы рыб или птиц явно недостаточно, поскольку как-то необходимо учитывать расстояние от камеры до особи. Чтобы обойти эту сложность, напри-мер, Бекко и соавторы [29] ограничили движение рыб по высоте, используя плоский широкий аквариум.

Использование нескольких камер для съемки стай с разных точек в даль-нейшем требовало трудоемкой обработки результатов для получения трех-мерной картины. Получение стереографических изображений с последую-

щей обработкой позволило определить расстояния между соседними индивидуумами в стаях скворцов и чернозобиков [19]. В менее давних исследованиях был обработан метод преобразования фотографий стаи в трехмерные компьютерные модели, что позволило получить мгновенные снимки положения сотен скворцов в стае [15], однако в задаче восстановления траекторий движения все еще остается поле для исследования.

По мере развития технологий, стало возможным создать маячки GPS, достаточно маленькие, чтобы их можно было закрепить на животном или птице, не мешая ему. К сожалению, с увеличением количества отслеживаемых индивидов возрастает и стоимость исследования. С другой стороны, такого рода устройства обладают ограниченной точностью в определении местоположения. Несмотря на приведенные выше ограничения, были проведены исследования пар [18, 30] или даже шестерок [17] тренированных голубей.

Помимо вышесказанного, в настоящее время увеличение точности сонаров и разработка определенной технологии применения, в которой океан выступает в роли акустического волновода, позволило использовать их для единовременного наблюдения за огромными количествами рыб на больших территориях океанического шельфа. [21]

Подводя итоги, можно отметить увеличение роли компьютера в накоплении и обработке экспериментальных данных. Текущая динамика позволяет надеяться что со временем будут получены данные не меньшей точности, чем получаемые во время численных экспериментов по различным моделям.

1.2 Основные результаты наблюдений

Поскольку экспериментальное наблюдение стадных явлений не является темой данной работы, мы не будем останавливаться подробно на результатах полевых или лабораторных исследованиях, тем более что всестороннее освещение этого вопроса дано в работе Вичека [9]. Однако для лучшего понимания распространенности в природе стадных явлений будет приведен

краткий обзор наиболее характерных, с нашей точки зрения, работ, сгруппированных по исследуемому материалу. Итак, в разные годы объектами исследования становились:

- а) Внутриклеточные соединения [10, 11]
- б) Колонии бактерий [13, 31]
- в) Насекомые [14]
- г) Птицы [15–19, 30]
- д) Рыбы [20, 22, 27]
- е) Млекопитающие, к примеру, буйволы [23]

Особняком в этом ряду стоят наблюдения за океаническим планктоном [32] и превышающие по своей численности наблюдения за любым другим типом объектов, наблюдения за поведением групп людей, например [33, 34].

Кроме того, в совершенно отдельную группу необходимо выделить лабораторные эксперименты, проводимые с неживыми объектами — нематической жидкостью, колеблющимися металлическими стержнями, наночастицами в жидкости, микророботами и тому подобным. [35–37]

Теперь приведем основные результаты, полученные в ходе наблюдений. Для начала, необходимо четко разделять работы, в которых исследования велись на плоскости (все, кроме указанных далее) и в которых наблюдения велись в трехмерном пространстве [15, 19, 27, 38]. Хотя, как выяснилось, для рыб такое разделение не вполне необходимо. Но обо всем по порядку.

Главный вывод, который в общем-то и не нуждается в подтверждении — это то, что существует отдельный класс перемещений группы индивидов как целого, и при этом перемещения отдельных индивидов оказываются упорядочены. То есть, при определенных условиях (чаще всего рассматривается различная плотность на единицу площади, или обеспеченность ресурсами в широком смысле слова) происходит спонтанное нарушение симметрии, и хаотическое движение сменяется упорядоченным. Как уже говорилось, это наблюдается на всех масштабах природы, и более того — совершенно не обязательно при этом прямое (визуальное или тактильное) взаимодействие между особями, и бывает достаточно опосредованного взаимодействия через среду обитания [9, с. 119]. Следующее наблюдение

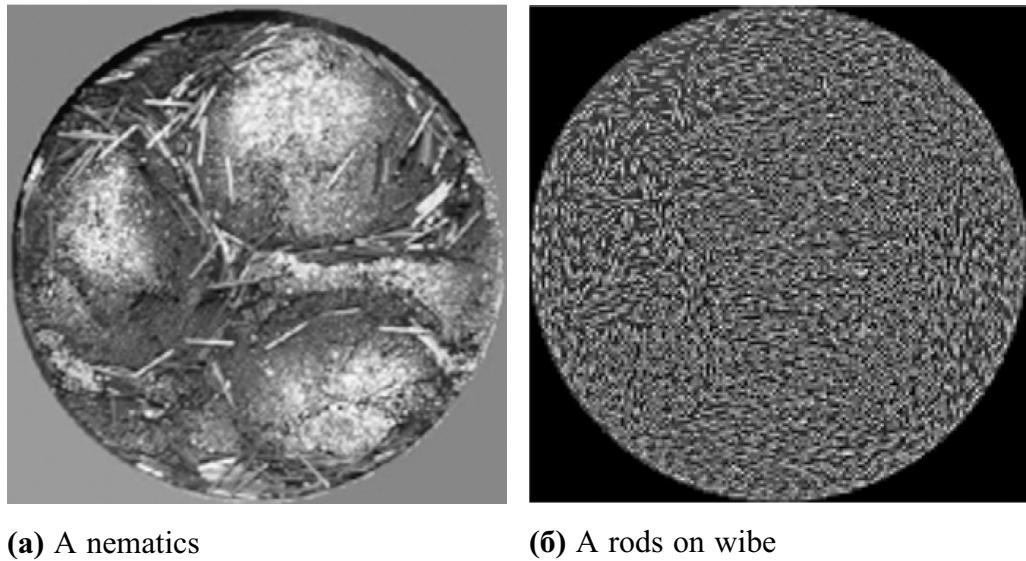


Рисунок 1.1 – Упорядочивание неживых объектов

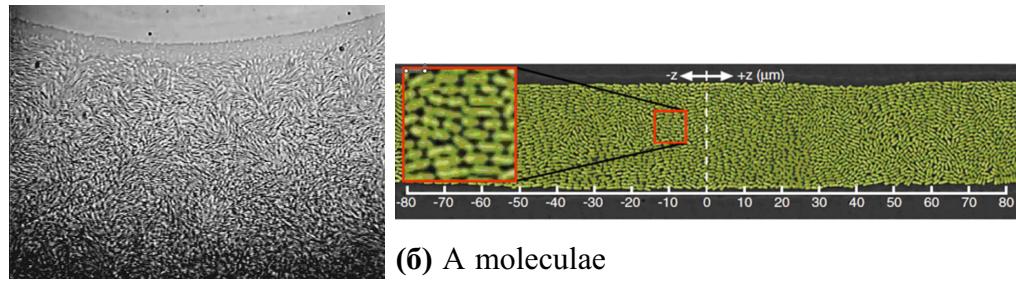


Рисунок 1.2 – Микроскопические проявления групповой динамики

на которое указывают многие авторы: при нарушении симметрии возникает и дальний порядок связи, к примеру, рыбы могут изменять общее направление движения практически мгновенно [20], а птицы — так-же быстро принимать решения о посадке. [19, 39].

более того, самым удивительным является то, что у всех живых существ и неживых предметов, при движении которых проявляются стадные явления, качественный характер этих явлений практически одинаков.

Наглядно это можно рассмотреть на рис. 1.1, 1.2, 1.3. Особенностью всех представленных на изображениях объединений является то, что они расположены на плоскости. И, как мы видим, возникает два типа упорядоченостей, иногда (как на рис. 1.1a) проявляющихся единовременно: это упорядоченное движение в спонтанно выбранном направлении или упоря-

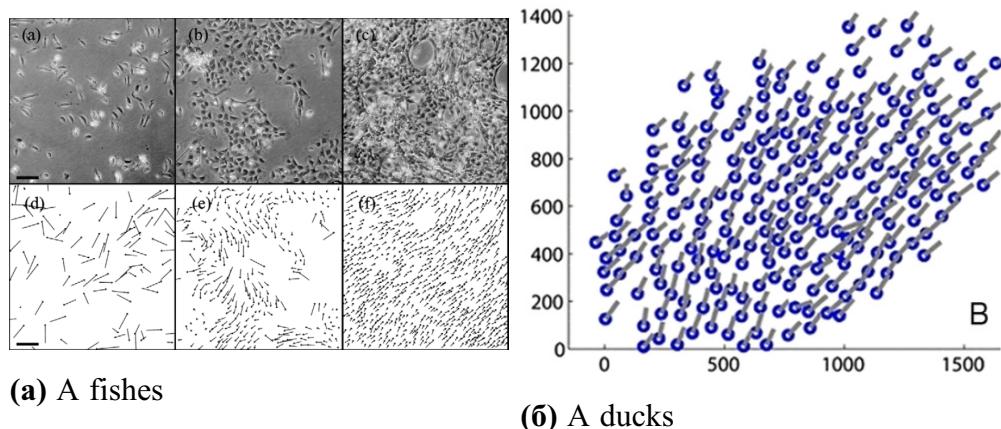


Рисунок 1.3 – Макроскопические проявления группового движения

доченное обращение вокруг некоторого центра. Видно также, что для совершенно, казалось бы, различных объектов групповое поведение является очень схожим.

Что же касается перемещений, не ограниченных в двух плоскостях, то нам хотелось бы заострить внимание на трех моментах.

Во-первых, в объемном пространстве также наблюдаются все вышеперечисленные упорядоченные перемещения: птицы сбиваются в стаю и летят в выбранном направлении [17], насекомые кружат вокруг улья [14] и т.п.

Во-вторых, и это является особенностью косяков рыб, возможно расслоение трехмерной группы на более плоские подгруппы, с наличием соединяющих (цилиндрических) столбов. Предполагается, что это связано с “мотивацией”, например, молодая стерлядь во время нереста предпочитает подниматься вниз. [40] При этом наблюдаются с рис. 1.4

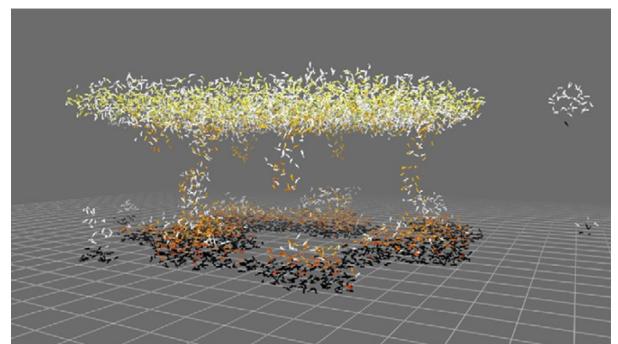


Рисунок 1.4 – Расслоение косяка рыб

мая нереста предпочитает подниматься выше, а более старая опускается вниз. [40] При этом наблюдаются структуры подобные изображенным на рис. 1.4

В дальнейшем в этой части можно указать что в групповых явлениях наблюдаются “лидеры”, которые могут задавать движение. Еще где-то надо сказать что фазовый переход переходит или при уменьшении шума, или при

увеличении плотности, наверно в следующем пункте

1.3 Качественные характеристики группового движения

Не смотря на то, что подобность движений различных типов объектов очевидна, для какого-либо исследования нельзя обойтись без качественных характеристик явления. Укажем отдельно характеристики объектов, которые участвуют в коллективном движении:

- а) все они похожи друг на друга
- б) они перемещаются с почти постоянной скоростью и способны изменять направление движения
- в) они взаимодействуют когда находятся на расстоянии меньшем эффективного, и посредством этого изменяют направление движения в стремясь к выравниванию
- г) направление движения подвержено шуму определенной амплитуды

Рассматривая же объекты в совокупности, необходимо заметить, что при определенных условиях происходит (скачкообразный) переход от разупорядоченного к упорядоченному движению. Такое явление называется фазовым переходом. Наиболее знакомые всем нам фазы, в которых может пребывать вещество: газообразная, жидккая и твердая — переходят одна в другую при изменении как минимум одного внешнего параметра — температуры. При этом плотность выступает в роли *параметра порядка* — некоторой величины, которая однозначно характеризует фазу вещества.

Пользуясь этой аналогией и помня о том, что изменяется только направление движения каждого объекта, в качестве параметра порядка было естественно определить следующей величиной:

$$\varphi = \frac{1}{Nv_0} \left| \sum_{i=1}^n \vec{v}_i \right| \quad (1.1)$$

Параметром порядка, согласно этому определению, является модуль средней скорости, нормированной на единицу. В уравнении 1.1 N — полное число объектов, v_0 — средний модуль скорости объектов в системе. Понятно,

что если движение неупорядочено, то скорости объектов направлены случайным образом, и такая сумма будет стремиться к нулю. Если же скорости направлены вдоль некоторого выбранного направления, то параметр порядка стремится к единице. Разумеется, как и всяческий статистический параметр, выражаемый через средние величины, это выражение имеет смысл только при больших N , иначе величина флуктуаций из-за каждого объекта будет слишком высокой.

Из статистической физики нам известно, что фазовый переход может происходить как в равновесной (замкнутой), так и в неравновесной системе. Ввиду того что в групповом движении, согласно рассматриваемой модели, участвуют самодвижущиеся частицы становится понятно, что системы с групповой динамикой сугубо неравновесны. Неравновесная статистическая физика в последнее десятилетие выделилась в отдельное направление физики, со своим словарем, объектом исследований и характерными процессами, вызывающими наибольший интерес исследователей в текущий момент времени. И потому, возможно, было бы предпочтительнее модифицировать модель или провести аналогии с фазовыми переходами, рассматриваемыми в рамках равновесной статистической физики. [9]

Эта идея, однако, кажется не приемлемой по некоторым соображениям: во-первых, в системах, демонстрирующих групповую динамику, наблюдаются совершенно не характерные для равновесной термодинамики явления, такие как “пробки” или флуктуации гигантского числа частиц []. А во-вторых, статистическая механика имеет дело с количеством частиц, стремящимся к бесконечности (10^{23}), и в рамках этого допущения определяет остальные понятия, в то время как явления группового перемещения наблюдаются при числе частиц, редко превышающем десятки тысяч.

Интересным было замечание [], указывающее на значительную аналогию в поведении систем, демонстрирующих групповую динамику, и феромагнитных систем. К примеру, рассматривая критические экспоненты, связанные с параметром порядка вида:

$$\sigma \sim |1 - \eta/\eta_c|^{-\gamma} \quad (1.2)$$

позволяют вычислить критические индексы γ . При этом получается, что критические индексы вычисленные, скажем, по модели Изинга, и вычисленные из (численных) экспериментов с системами, демонстрирующими групповую динамику, оказываются в хорошем согласии между собой. За более полной информацией о параллелях между феромагнетиками и системами с групповой динамикой смотри [].

doi:10.

Итак, резюмируя, в системах с коллективными эффектами происходит фазовый переход, при этом параметром порядка выступает средняя векторная скорость 1.1, а в качестве “температуры” — шум, т.е. некоторое добавочное воздействие, которое случайным образом изменяет направление движения каждого объекта в рассматриваемой системе. Возникает вопрос — единственный ли это параметр, который может повлиять на фазу системы и привести к фазовому переходу? Как было экспериментально проверено Камбуи [20] и многими другими, фазовый переход в системе взаимодействующих объектов также возможен при увеличении плотности. Кроме “обычного” фазового перехода, при котором изменяется только направление скорости объектов, иногда наблюдается явление, в котором при увеличении плотности уменьшается скорость перемещения объектов, и образуется “пробка”[] На этом мы заканчиваем, сложность систем требует вдумчивого и основательного подхода, и потому изначально было предложено значительное количество компьютерных моделей [1–4, 41], и лишь потом, на основании результатов, полученных в численных экспериментах, были разработаны теоретические подходы к групповому движению. [8, 26, 42–46]

4470/

Keller
segel,

ГЛАВА 2

КОМПЬЮТЕРНЫЕ МОДЕЛИ ГРУППОВОЙ ДИНАМИКИ

Позабыты хлопоты, остановлен бег -
Вкалывают роботы, а не человек.

Ю. Энтин - “Вкалывают роботы”

Как было сказано в главе 1, основной сложностью в исследовании процессов, происходящих в рое, является невозможность уследить сразу за всеми представителями. В первую очередь проблема заключается в высокой технической сложности гарантированно отличить одну особь от другой.

2.1 Основные модели

Моделированием групповых эффектов начали заниматься в 70е годы несколько групп ученых - биологов, физиков и специалистов по компьютерной графике. Первая широко известная модель была предложена Рейнольдсом [1]. В его модели поведение объектов (боидов) определялось из расчета наилучшего визуального представления. Боиды могли демонстрировать три типа взаимодействия: избегание столкновений, следование в направлении ближайших боидов и стремление к центру масс стаи, рис. 2.1. С тем, чтобы привнести в изучение групповых эффектов количественный подход, была

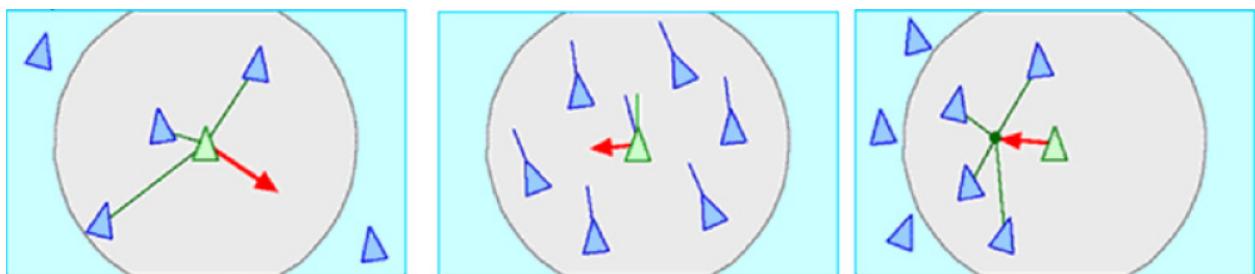


Рисунок 2.1 – Поведение, основное для модели Рейнольдса. (а) Разделение, с тем чтобы избежать чрезмерного скапливания боидов. (б) Выравнивание: боиды поворачивают в направлении средней скорости окружающих боидов. (в) Когезия: боиды смещаются в направлении центра масс окружения

предложена модель, широко известная сейчас как “модель Вичека” [2]. Поведение частиц в этой модели определяется следующими соотношениями:

$$\vec{v}_i(t+1) = v_0 \frac{\langle \vec{v}_i(t) \rangle_R}{|\langle \vec{v}_j(t) \rangle_R|} + perturbation \vec{x}_i(t+1) = \vec{x}_i(t) + \vec{v}_i(t+1) \quad (2.1)$$

Здесь $\langle \dots \rangle_R$ обозначают усреднение (или суммирование) по всем частицам в радиусе R вокруг i -й. Тогда $\frac{\langle \vec{v}_i(t) \rangle_R}{|\langle \vec{v}_j(t) \rangle_R|}$ предоставляет нам единичный вектор в направлении средней скорости группы частиц. Такое выравнивающее правило не принимает во внимание характер взаимодействия, и потому модель может соответствовать когезии, взякости и тому подобному. Введение шума в модель может выполняться различными способами. В оригинальной работе было предложено следующее: поскольку единичный вектор однозначно соответствует углу, задающему направление, и скорость частиц также можно задавать в виде модуля скорости и единичного вектора направления, то тогда угол направления движения в момент времени $(t+1)$ получается следующим образом:

$$\vartheta_i(t+1) = \vartheta_i(t) + \Delta_i(t) \quad (2.2)$$

где $\vartheta_i(t) = \arctan\left[\frac{\langle \vec{v}_i(t) \rangle_R}{|\langle \vec{v}_j(t) \rangle_R|}\right]$, и шум представлен $\Delta_i(t)$ - случайное число равновероятно выбранное из $[-\eta\pi, \eta\pi]$. Единственными параметрами модели является плотность ρ , модуль скорости частиц v_0 и уровень шума, определяемый $\eta < 1$. Параметром порядка становится $\varphi = 1/Nv_0|\sum_{i=1}^n \vec{v}_i|$, как определено в уравнени 1.1.

Несмотря на кажущуюся простоту этой модели, она демонстрирует богатый спектр свойств, характерных для систем, демонстрирующих групповую динамику. В первую очередь это, конечно же, фазовый переход к упорядоченному движению. Помимо этого, варьируя указанные выше параметры модели, удавалось получить различные паттерны, характерные для групповой динамики, а именно вращающиеся “цепи”, “ленты”, “мельницы”, “марширующие группы” и другие. При определенных условиях возможно получение интересных результатов по таким вопросам как ГЧФ или формирование лент.

Интересным вопросом является род фазового перехода. В своей оригинальной работе Вичек и соавторы показали, что наблюдается переход

второго рода от разупорядоченного к упорядоченному движению. То есть, при переходе к термодинамическому пределу поведение параметра порядка недалеко от фазового перехода описывается

$$\varphi \sim [\eta_c(\rho) - \eta]^\beta \quad (2.3)$$

$$\varphi \sim [\rho - \rho_c(\eta)]^\delta \quad (2.4)$$

Где [] и было получено что [] Однако непрерывная природа фазового перехода была поставлена под вопрос Грегуаром и Шате [3], что привело к серии работ адресующих этот фундаментальный вопрос коллективного движения. В результате экстенсивного исследования Шате и соавторам [7] удалось показать (численным экспериментом) существование т.н. переходного режима, в котором непрерывный характер перехода не зависит от модуля скорости частиц.

Надо

В то же время было обнаружено, что тип фазового перехода зависит от модуля скорости частиц и шума (вернее, того, как шум вводится в систему). Проведенные исследования показывают, что для малых скоростей $v_0 < 0.5$, даже в пределе скорости $v_0 \rightarrow 0$ наблюдается фазовый переход второго рода. Для больших скоростей фазовый переход аналогичен фазовому переходу первого рода. Косвенным свидетельством этого является формирование “лент”.[6]

пр-
чи-
тать
вни-
ма-
тель-
но

Существует две возможности привнести шум в систему: в виде случайного угла, на который поворачивается скорость частицы *после* выравнивания с учетом направления движения окружения, и в виде случайногоник вектора, который добавляется ко всем частицам *до* определения преимущественного направления движения. Первый вариант используется в модели Вичека, в то время как второй вариант был предложен Грегуаром и Шате [3]. И как было показано численным экспериментом [47], модель Вичека испытывает фазовый переход второго рода, в то время как при введении “векторного” шума возможно состояние при котором фазовый переход является переходом первого рода [24].

За годы прошедшие с момента создания модели Вичека, было предложено определенное количество моделей самодвижущихся частиц, воспро-

изводящих групповую динамику или отдельные характерные эффекты.

Можно выделить два типа такого рода моделей - в одних прямо вводится правило выравнивания частиц, а в других рассматривается опосредственное взаимодействие, к примеру, через столкновения или среду обитания. Однако, их обзор не входит в рамки данной работы, потому интересующимся рекомендуем обратиться к литературе, в особенности к [9].

ГЛАВА 3

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГРУППОВОЙ ДИНАМИКИ

Теоретический подход к описанию групповых явлений был впервые предложен в 2000 году Tu [8], и был основан на соображениях симметрии. Будучи развитым Bertin'ом [26], этот подход привел к получению уравнений движения, подобных уравнениям Навье-Стокса (подробнее см. 3.1).

Адресуя вопрос о допустимости такого подхода, группой ученых был предложен иной подход [43, 45], основанный на статистическом описании системы через функционал микроскопической фазовой плотности. Как было указано в [], разница между этими подходами заключается в наличии вязкости в уравнениях первой группы (раздел 3.1), но при этом в уравнениях второй группы (раздел 3.2) вязкий член не появляется.

Рассмотрим далее основные постулаты и уравнения двух теорий.

3.1 Классические модели

3.1.1 Феноменологические уравнения

Основываясь на соображениях симметрии, и используя методы теории ренормализационных групп, Tu [8] выписал обобщенные уравнения движения для систем, состоящих из частиц, взаимодействующих по правилу Vicsek'a, рассмотренному в разделе 2.1.

Им были отмечены следующие общие характеристики, которыми обладают все компьютерные модели групповой динамики, а именно:

- а) Большое число точечных частиц (“боидов”) перемещается со временем в пространстве, стремясь “следовать” (т.е. двигаться в одном направлении) за своими соседями
- б) Взаимодействие короткодействующее: каждый “боид” реагирует на окружение внутри определенного малого радиуса R
- в) “Следование” не совершенно - каждый “боид” постоянно совершает ошибки, которые моделируются белым шумом

г) Модель обладает полной вращательной симметрией - “стая” может направиться в любом направлении

На основании этих наблюдений, были записаны уравнения движения

$$\begin{aligned} \partial_t \mathbf{v} + \lambda_1(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \lambda_2(\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{v} + \lambda_3 \nabla(|\mathbf{v}|^2) \\ = \alpha \mathbf{v} - \beta |\mathbf{v}|^2 \mathbf{v} - \nabla P + D_T \nabla^2 \mathbf{v} + D_B \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}) + D_2 (\mathbf{v} \cdot \nabla)^2 \mathbf{v} + \mathbf{f} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Уравнение, описывающее давление

$$P = P(\rho) = \sum_{n=1}^{\infty} \sigma_n (\rho - \rho_0)^n \quad (3.2)$$

И аналог уравнения неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \rho) = 0 \quad (3.3)$$

Рассмотрим происхождение слагаемых в уравнении 3.1.

Следует отметить, что невыполнение Галилеевой инвариантности, в отличие от уравнений Навье-Стокса, приводит к тому, что все коэффициенты λ_i не равны нулю. Члены при λ_i аналогичны конвективным членам в уравнениях Навье-Стокса.

Коэффициенты α и β введены для того чтобы модуль скорости, вычисленный локально, было больше нуля в упорядоченной фазе.

Нам наиболее интересны члены при коэффициентах $D_{B,1,2}$, по форме которых можно сказать, что указанные коэффициенты выполняют роль диффузионных констант, или вязкостей, и отображают стремление локальных флуктуаций к распространению из-за связи между соседними бoidами [8].

Сферическая симметрия не налагает никаких ограничений на потенциально возможную зависимость каждого из феноменологических коэффициентов от квадрата модуля скорости $|\mathbf{v}|^2$, или от плотности ρ .

В ходе анализа феноменологического движения было показано [8], что возможно формирование стабильной упорядоченной фазы в двумерном пространстве (что наглядно видно в симуляциях, рассмотренных в главе 2). Однако, известно что это нарушает теорему Мермина-Вагнера (которая также не выполняется для дискретной спиновой модели).

3.1.2 Больцмановский подход к получению уравнений движения

Bertin et all, развивая подход, предложенный Tonner'ом и Ти, рассмотрели определенную модельную задачу. В их определении существовало исключительно парное взаимодействие между частицами, а шум был определен как “самодиффузия” [26].

Записывая диффузионный и коллизионный интегралы, которые следуя подходу Больцмана, подчиняются соотношению вида

$$\frac{\partial f}{\partial t}(\mathbf{r}, \theta, t) + \mathbf{e}(\theta) \cdot \nabla f(\mathbf{r}, \theta, t) = I_{diff}[f] + I + coll[f] \quad (3.4)$$

где $\mathbf{e}(\theta)$ - единичный вектор в направлении θ , и пользуясь методами теории ренормализационной группы, было получено следующее уравнение движения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \gamma(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} &= -\frac{1}{2} \nabla(\rho - \kappa \mathbf{v}^2) \\ &\quad + (\mu - \varepsilon \mathbf{v}^2) \mathbf{v} + \nu \nabla^2 - \kappa(\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{v} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Как можно заметить, все члены этого уравнения совместимы с феноменологическим уравнением предложенном Ти и рассмотренном в предыдущем пункте 3.1.1.

Первый член в правой части уравнения 3.5 представляет собой градиент давления, и таким образом эффективное давление становится равным $p = \frac{1}{2}(\rho - \kappa v^2)$.

Наиболее интересным с нашей точки зрения является третий член в правой части уравнения 3.5, поскольку он очевидно соответствует проявлению вязкости, с коэффициентом вязкости ν равным

$$\nu = \frac{1}{4} [\lambda(1 - e^{-2\sigma_0^2}) + \frac{4}{\pi} \rho (\frac{14}{15} + \frac{2}{3} e^{-2\sigma^2})]^{-1} \quad (3.6)$$

Анализ вышеприведенного уравнения 3.5 также показал наличие стабильной упорядоченной фазы при определенных условиях.

Было замечено [45, 48], что приведенный в этом разделе подход к построению теоретической базы группового движения обладает определенными допущениями, плохо согласующимися с моделью Вичека. Во-первых, совершенно очевидно, что для наличия вязкости необходимо столкновение частиц, что невозможно если рассматривать точечные частицы, а значит, хоть феноменологическое уравнение формально правильное, необходимо наложить определенные ограничения на значений коэффициентов. Во-вторых, Больцмановский подход вообще говоря не применим в силу отсутствия в модели Vicsek'а стохастического хаоса, связанного с, опять-же, столкновениями частиц и равновероятностью всех направлений движения в пространстве.

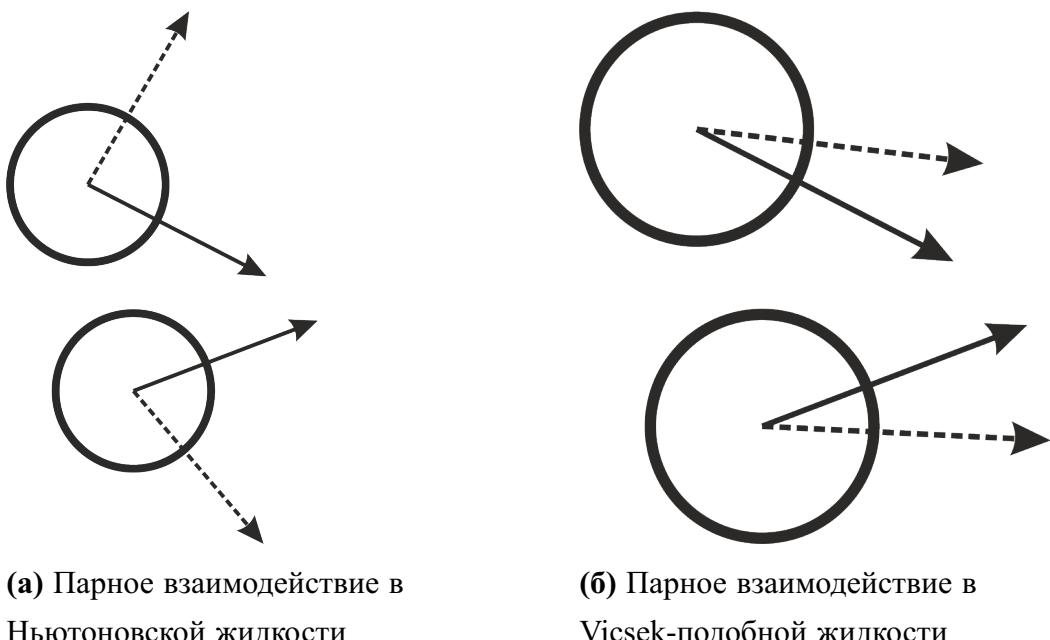


Рисунок 3.1 – Взаимодействие между частицами в разных моделях жидкости, непрерывная линия - направление скорости до взаимодействия, пунктирная - после.

Однако как мы видим на рис. 3.1, для модели Vicsek'а наоборот выполняется увеличение упорядоченности при взаимодействии. Вопрос о применимости шума в качестве стохастического хаоса остается открытым.

Одно
на-
зы-
ва-
ние
Vikse
подоб-
жид-
ко-

3.2 Модель микроскопической фазовой плотности

Подход, основанный на рассмотрении функционала микроскопической фазовой плотности, предложенный в последние годы [45, 49], позволил получить, в приближении идеальной самодвижущейся жидкости, уравнения движения, отличные от рассмотренных в разделе 3.1.

Строгое получение этих уравнений выходит далеко за рамки работы, потому приведем здесь только исходные положения и результаты.

Функционал микроскопической фазовой плотности записывается следующим образом:

$$N(x, t) = \sum_i \delta(x - x_i(t)) \quad (3.7)$$

где $x = (\mathbf{r}, \mathbf{v})$, подчиняется закону сохранения

$$\partial_t N + \mathbf{v} \partial_{\mathbf{r}} N + \partial_{\mathbf{v}}(\dot{\mathbf{v}} N) = 0 \quad (3.8)$$

Соответствующие плотность и поток плотности получаются как

$$\rho^{(m)}(\mathbf{r}, t) = \int N(x, t) d\mathbf{v} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{j}^{(m)}(\mathbf{r}, t) = \int \mathbf{v} N(x, t) d\mathbf{v} \quad (3.10)$$

В контексте модели Vicsek'a, уравнение движения без шумового члена записывается как

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{v}_i \quad (3.11)$$

и отображает тот факт, что энергия частиц в алгоритме Vicsek'a сохраняется.

Путем несложных, но весьма громозких преобразований, для предельного случая идеальной самодвижущейся жидкости можно получить следующее уравнение движения:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} = -\frac{1}{2\rho} \frac{\partial}{\partial x} (\rho - \rho v^2) + \left(\frac{\rho}{2} - \frac{\alpha}{\rho} \frac{\partial v}{\partial x} \right) \mathbf{v} + \frac{\beta}{\rho} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} + \frac{\rho}{2} + \frac{\alpha}{2} v^3 \quad (3.12)$$

Полученное уравнение показывает, что самодвижущиеся жидкости ведут себя отлично от молекулярных жидкостей, и даже от жидкостей, состоящих из активных броуновских частиц.

Сравнение же этих результатов с показанными в разделе 3.1, как уже говорилось, приводит к возникновению вопроса о существовании вязкости в модели Vicsek'a

ГЛАВА 4

Численный эксперимент

4.1 Задача, поставленная перед численным моделированием

Как мы рассмотрели в главе 3, на данный момент существует два основных теоретических подхода к описанию группового движения. Основным отличием между ними является наличие (или отсутствие) вязкости. Поскольку обе модели являются приближенными, и к тому же допускают решение только в ограниченном числе случаев, прямое сравнение результатов с экспериментом провести достаточно затруднительно. Однако, проведение эксперимента само по себе не является проблемой - как указано в главе 2, компьютерное моделирование является основным способом изучения систем, демонстрирующих групповую динамику.

Таким образом, поставив численный эксперимент над системой с граничными условиями, в которой обязательно проявляется вязкость, можно получить ответ на главный вопрос - присутствует ли вязкость в самодвижущейся жидкости?

Такого рода системой было выбрано течение Куэтта, несколько адаптированное к реалиям самодвижущихся частиц, см. раздел 4.3.

Прежде чем перейти к описанию работы приложения, необходимо отметить несколько замечаний, которые способны существенно сократить время симуляций.

- В силу детерминированности взаимодействия частиц в модели Vicsek'a, возможно выполнение симуляции в несколько потоков
- Простота модели, и очевидная локальность взаимодействия позволяет, при помощи специального размещения данных в памяти, существенно сократить число вычислений
- Кроме того, простые арифметические действия, из которых состоят уравнения движения 2.1, позволяют перенести вычисления на GPU, используя CUDA-подобную технологию C++ AMP
- Для формирования устоявшегося состояния системы, из статистиче-

ской механики известно, что достаточно чтобы флуктуации параметра порядка были $< \frac{1}{\sqrt{N}}$, где N - число частиц. Это может быть использовано в качестве критерия для прекращения симуляции

Подробнее эти вопросы будут рассмотрены в разделе [4.2](#)

4.2 Оптимизации, проведенные в программе-симуляторе

4.2.1 Особенности многопоточной обработки данных

Широко известно, что увеличение тактовой частоты процессоров натолкнулось на физический предел, связанный с увеличением роли токов утечки в транзисторах при уменьшении размеров, и потому основной тренд в современном компьютеростроении - это наращивание числа ядер в процессорах, и улучшение эвристик, позволяющих использовать т.н. гиперпоточность. Итогом этого стала потенциальная возможность проводить вычисления вплоть до 30-ти потоках одновременно, используя при этом только один процессор общего назначения (CPU).

Когда речь идет о задачах молекулярной динамики, предполагается симуляция взаимодействия хотя-бы нескольких сотен тысяч частиц. По счастью, групповые явления наблюдаются и на гораздо меньшем масштабе - несколько (десятков) тысяч частиц.

Свойство модели Vicsek'а, позволяющее успешно разбить задачу на множество потоков, ограниченное сверху лишь числом частиц заключается в том, что положения и скорости частиц в один момент времени однозначно определяют положения и скорости этих частиц в следующий момент. Также важно отметить, что это совершенно не зависит от порядка учета частиц. Таким образом, при разработке программы для выполнения на CPU мы можем безо всяких недостатков получить практически линейное увеличение скорости вычислений в зависимости от доступного нам числа потоков.

Задача несколько осложняется, если мы захотим пойти по пути всех исследовательских групп, и организовать выполнение приложения на вычислительном кластере. Поскольку, как мы видим на рис. [4.1](#), между отдель-

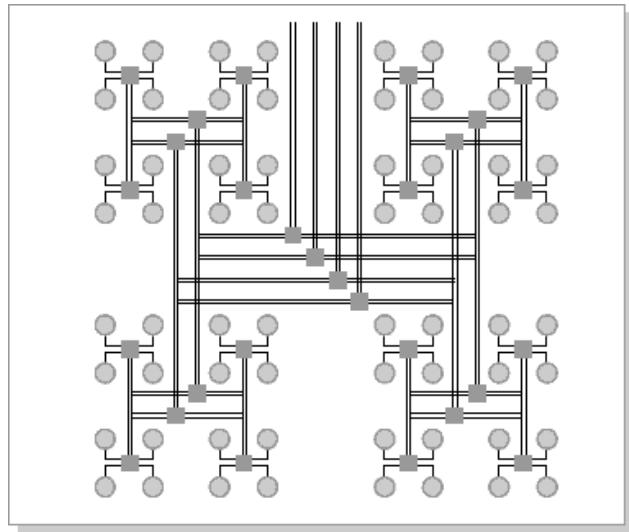


Рисунок 4.1 – Пример архитектуры вычислительного кластера

ными узлами кластера проложены связи по локальной сети, здравый смысл подсказывает, что доступ к общей памяти в такой архитектуре окажется куда медленней, чем если бы вся информация была доступна локально. Даже несмотря на возможность скопировать данные для вычислений на каждый из узлов, все равно требуется оптимизировать обмен данными после каждого шага.

Кроме того, обычно очередьность доступа к вычислительному кластеру жестко ограничивает возможность быстро исправить что-либо в программе и сразу же перезапустить ее для получения нового результата.

4.2.2 GPGPU вычисления

Проблема кластерных вычислений осложняется, помимо всего прочего, малой доступностью такого рода услуг. Здравый смысл подсказывает, что оборудование вычислительного кластера - сложный и дорогостоящий процесс, даже не принимая во внимание дальнейшее обслуживание компьютерного парка. Поэтому, малым группам ученых без высокого финансирования необходимо искать обходные пути, не требующие доступа к кластерным суперкомпьютерам.

Таким путем является использование графических процессоров для про-



Рисунок 4.2 – Пример архитектуры графического процессора

ведения вычислений общего назначения. Как показано на рис. 4.2, по существу графический процессор состоит нескольких сотен (или тысяч) простейших, т.н. потоковых процессоров, которые обладают поддержкой ограниченного набора инструкций, но при этом способных выполнять их действительно быстро. Кроме того, количество переходит в качество - простейшие вычисления, которые можно разбить на множество потоков могут выполняться одновременно всеми процессорами видеокарты.

Также на диаграмме можно заметить, что процессоры GPU, аналогично вычислительным юнитам в кластере, сгруппированы в “вычислительные блоки”, с общим доступом к элементу памяти. Это позволяет проводить часть вычислений пользуясь локальной копией данных, а затем отправлять результаты в “общий буфер” - область памяти к которой имеют доступ все потоковые процессоры.

В контексте модели Vicsek’а это позволяет нам, путем периодической сортировки частиц так, чтобы локально взаимодействующие частицы оказывались в смежной области памяти, существенно уменьшить число обращений к общей, и потому более медленной, памяти.

4.2.3 Определение равновесного состояния системы

Помимо сугубо прикладных аспектов, т.е. вопроса “на чем считать?”, необходимо отметить, что стандартная практика, применяемая во всех работах по моделированию самодвижущихся частиц, это запустить симуляцию для определенного значения шума, прождать от 10^4 до 10^6 шагов по времени, с тем чтобы “минимизировать влияние начального распределения”, [6], и после этого заполучить результат. В некоторых работах, кроме того, производится усреднение интересующих значений по всему времени симуляции, к примеру в [3].

В условиях острой ограниченности вычислительных ресурсов, мы полагаем такой подход крайне расточительным. Потому, нами был предложен несложный алгоритм, позволяющий проводить симуляции столько, сколько потребуется для стабилизации значения интересующей нас величины, т.е. чтобы отклонения не превышали, в среднем, тех которые происходят под влиянием динамических флуктуаций. Подробнее этот алгоритм будет рассмотрен в разделе 4.4

4.3 Адаптация граничных условий течения Куэтта

Как известно, течение Куэтта является простейшим примером системы, в которой вязкие силы играют основную роль в формировании профиля потока. Напомним основные положения в постановке задачи.

Как изображено на рисунке 4.3, в двумерном течении Куэтта боковые границы удалены на бесконечность (или, что то же самое, реализуют трансляционные граничные условия), нижняя граница неподвижна ($v(0) = 0$), а верхняя движется со скоростью u_0 : $v(h) = u_0$. В зависимости от наличия или отсутствия градиента давления, профили скорости потока получаются как изображенные на рисс. 4.3б 4.3а соответственно, и описываются уравнением

$$u(y) = u_0 \frac{y}{h} + \frac{1}{2\mu} + \left(\frac{dp}{dx} (y^2 - hy) \right) \quad (4.1)$$

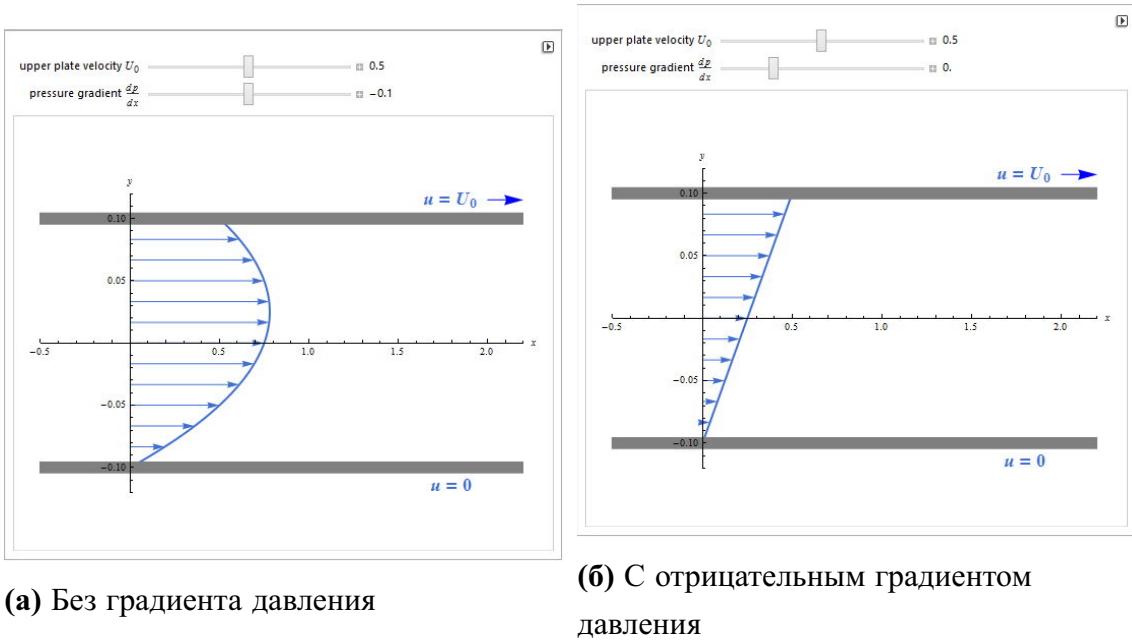


Рисунок 4.3 – Профиль скорости течения Куэтта

Однако из-за того, что рассматриваемая нами система существенно неравновесна, а частицы обладают собственным моментом движения, применение этих граничных условий при симуляции несколько затруднительно. Во-первых, при прилеплении частиц к верхней или нижней стенке, они очень быстро будут изъяты из потока, и в середине ничего не останется. Во-вторых, даже поставить нулевое значение скорости на нижней границе невозможно в силу того, если остановить приблизившиеся на радиус взаимодействия частицы, то очень скоро остановятся все частицы, что следует из уравнения 2.1.

Потому, нами было предложено два варианта адаптации задачи Куэтта для самодвижущейся жидкости. В обоих из них верхняя граница считается, в некотором роде, непрерывным слоем частиц, движущихся в указанном направлении, и при подхождении частицы на радиус взаимодействия к границе, после взаимодействия этой частицы с остальными частицами, происходит взаимодействие с границей как с еще одной частицей, см. рис. 4.4.

На нижней границе в одном варианте адаптации происходит зеркальное отражение частицы, а в другом частица отражается на угол меньший, чем угол падения, что в нашем понимании соответствует “трению” с “шерох-

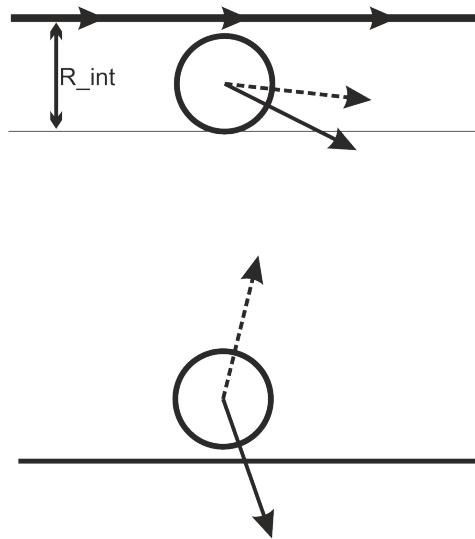


Рисунок 4.4 – Границные условия для адаптированного течения Куэтта

ватой” границей. В большинстве симуляций использовался именно первый вариант, подробнее см. в главе 5.

4.4 Алгоритм определения стабилизации состояния системы

Однако, предложено использовать простой критерий релаксации системы. Как известно из термодинамики, влияние флуктуаций на параметры системы пропорционально $1/\sqrt{N}$, где N - число частиц. Потому мы предложили выполнять для начала 100 шагов по времени для каждого значения шума, а затем, если разница средней скорости и средней скорости на предыдущей итерации HE оказывается меньше чем $1/\sqrt{N}$, то продолжать симуляцию с тем же значением шума (см. алгоритм на рис. 4.5)

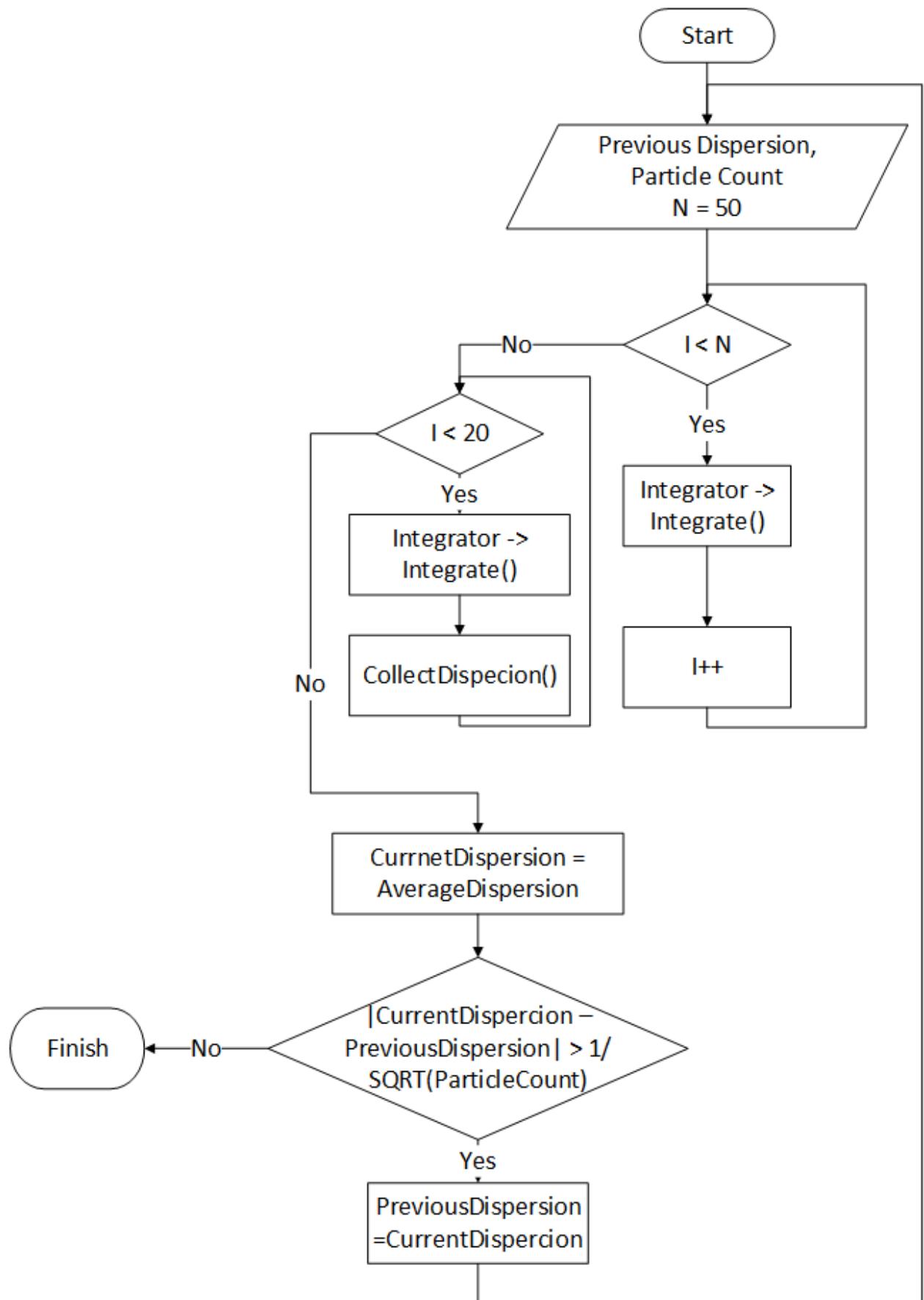


Рисунок 4.5 – Алгоритм определения стабильного состояния системы

ГЛАВА 5

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В результате выполнения работы, нами были получены профили скорости (т.е. зависимость параметра порядка от высоты) для течения Куэтта идеальной самодвижущейся жидкости по модели Vicsek'a.

Предложенный алгоритм определения стабилизации состояния системы оправдал себя. Поскольку определение времени стабилизации не входило в тему данной работы, то специальных замеров не проводилось, но среднее значение времени симуляции для каждого значения шума составило 10^{2-3} по порядку величины, увеличиваясь с увеличением количества частиц.

Проверка работоспособности алгоритма, и его невлияние на предполагаемый результат была проведена прямой симуляцией системы, аналогичной одной из [2], и были построены графики зависимости параметра порядка от безразмерного шума, представленные на рис. 5.2

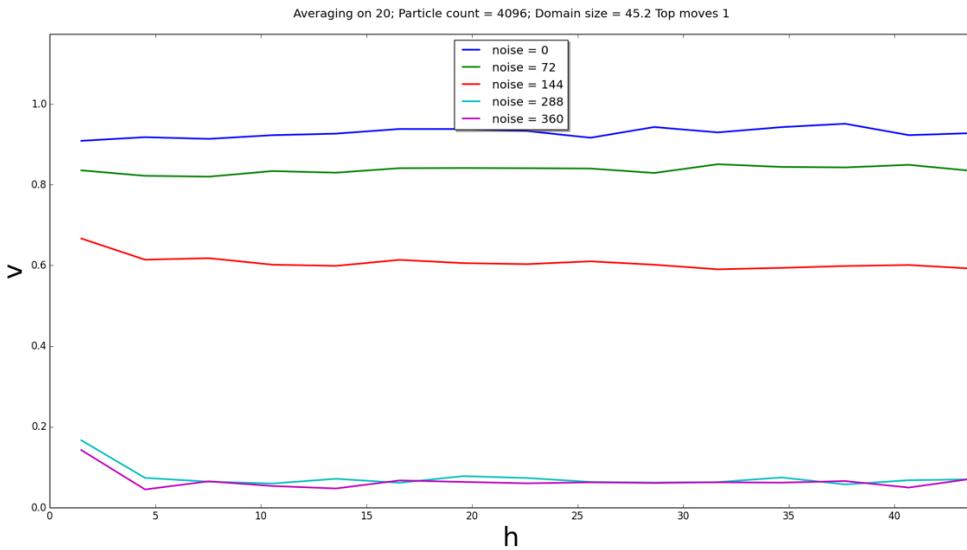
Кроме того, были проведены более длительные симуляции для отдельных значений шума (в частности, очень большого и очень низкого). Полученные результаты не вошли в эту работу по причине того, что они аналогичны представленным на рис. 5.1.

Побочным результатом выполнения работы также стало создание программы, способной выполнять симуляции идеальной самодвижущейся жидкости по модели Vicsek'a на GPU, и легко доступной для модернизации.

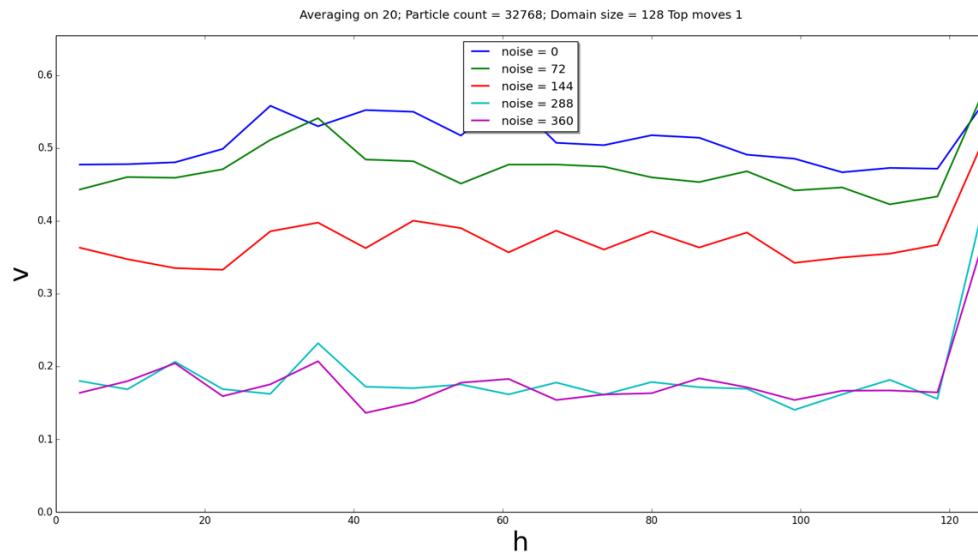
ВЫВОДЫ

Главным выводом, который можно сделать из результатов работы, является полная несостоятельность теоретического описания, основанного на подходе Больцмана, и дающего в результате ненулевые значения вязкости, поскольку, как видно из представленных результатов, профили скорости в случае идеальной самодвижущейся жидкости никак не соответствуют предполагаемым профилям Куэттового потока.

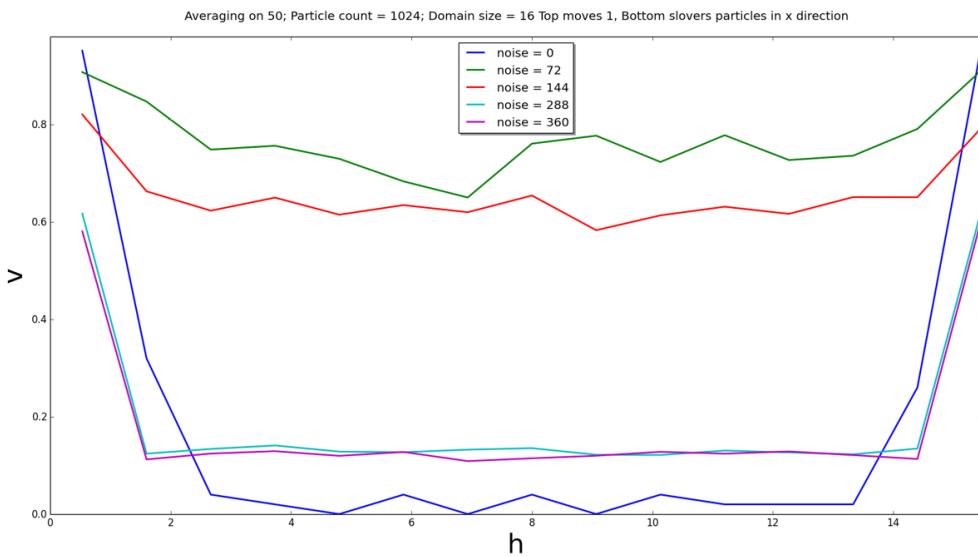
Благодаря предложенному алгоритму удалось радикально сократить время, необходимое для проведения симуляций. Конечно, по мере стремления



(а) Число частиц: 4096; Плотность: 2; Число конфигураций: 20; Зеркальная граница



(б) Число частиц: 32768; Плотность: 2; Число конфигураций: 20; Зеркальная граница



(в) Число частиц: 1024; Плотность: 4; Число конфигураций: 50; Шероховатая граница

Рисунок 5.1 — Зависимость параметра порядка от высоты для течения Куэтта при разных значениях шума.

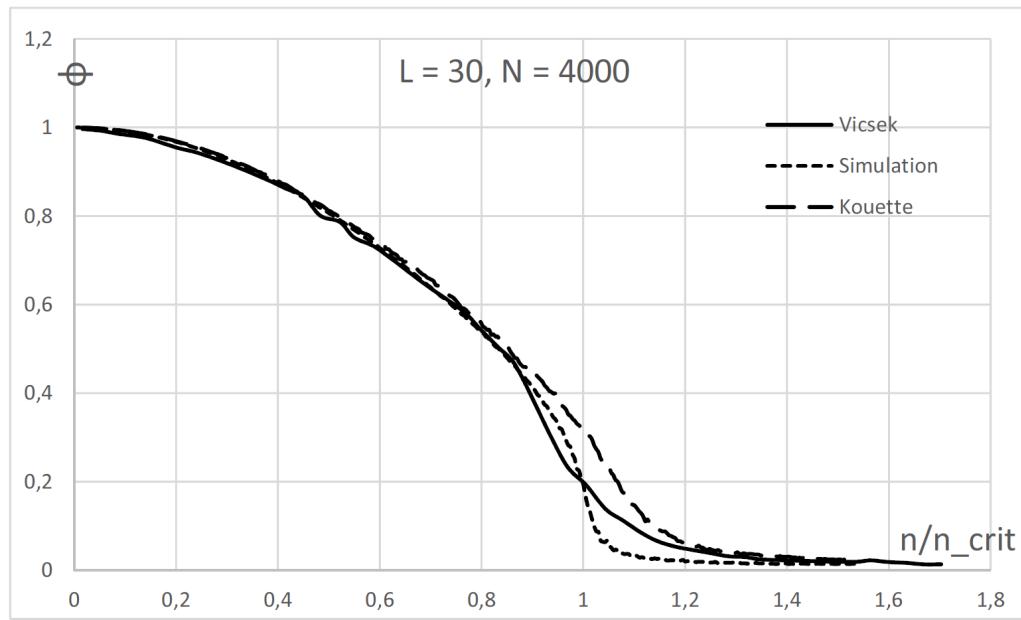


Рисунок 5.2 – Зависимость параметра порядка от безразмерного шума

к термодинамическому пределу требуемое для релаксации время будет увеличиваться, но для всех разумных значений числа частиц алгоритм может быть полезен, если правильно выбрать параметр стабилизации.

Наконец, использование GPU для проведения физических расчетов с высоким фактором параллелизации не только оправдано, но и необходимо - замеренная производительность GPU превышает производительность CPU более чем в 100 раз!

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reynolds C. W. Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model // *SIGGRAPH Comput. Graph.* 1987. Vol. 21, no. 4. P. 25–34.
2. Vicsek T., Czirók A., Ben-Jacob E. et al. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles // *Physical Review Letters*. 1995. Vol. 75, no. 6. P. 1226.
3. Grégoire G., Chaté H. Onset of collective and cohesive motion // *Physical review letters*. 2004. Vol. 92, no. 2. P. 025702.
4. Schubring D., Ohmann P. R. Density-independent model of self-propelled particles // *Phys. Rev. E*. 2013. Vol. 88, no. 3. P. 032108.
5. Kümmel F., ten Hagen B., Wittkowski R. et al. Circular Motion of Asymmetric Self-Propelling Particles // *Physical Review Letters*. 2013. Vol. 110, no. 19.
6. Huepe C., Aldana M. New tools for characterizing swarming systems: A comparison of minimal models // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2008. Vol. 387, no. 12. P. 2809–2822.
7. Chaté H., Ginelli F., Grégoire G. et al. Modeling collective motion: variations on the Vicsek model // *The European Physical Journal B*. 2008. Vol. 64, no. 3-4. P. 451–456.
8. Tu Y. Phases and phase transitions in flocking systems // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2000. Vol. 281, no. 1–4. P. 30 – 40.
9. Vicsek T., Zafeiris A. Collective motion // *Physics Reports*. 2012. Vol. 517, no. 3-4. P. 71–140.
10. Keller E. F., Segel L. A. Model for chemotaxis // *Journal of Theoretical Biology*. 1971. Vol. 30, no. 2. P. 225–234.
11. Chowdhury D. Collective effects in intra-cellular molecular motor transport: Coordination, cooperation and competition // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2006. Vol. 372, no. 1. P. 84–95.

12. Czirok A., Vicsek M., Vicsek T. Collective motion of organisms in three dimensions // *Physica A*. 1999. P. 299–304.
13. Csahók Z., Czirók A. Hydrodynamics of bacterial motion // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 1997. Vol. 243, no. 3–4. P. 304 – 318.
14. Buhl J. From Disorder to Order in Marching Locusts // *Science*. 2006. Vol. 312, no. 5778. P. 1402–1406.
15. Ballerini M., Cabibbo N., Candelier R. et al. Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance: Evidence from a field study // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2008. Vol. 105, no. 4. P. 1232–1237.
16. Selous E. Thought-transference (or What?) in Birds. R.R Smith, 1931. LCCN: 32001018.
17. Dell’Ariccia G., Dell’Omo G., Wolfer D. P., Lipp H. Flock flying improves pigeons’ homing: GPS track analysis of individual flyers versus small groups // *Animal Behaviour*. 2008. Vol. 76, no. 4. P. 1165–1172.
18. Biro D., Sumpter D. J. T., Meade J., Guilford T. From compromise to leadership in pigeon homing // *Current biology: CB*. 2006. Vol. 16, no. 21. P. 2123–2128. PMID: 17084696.
19. Major P. F., Dill L. M. The three-dimensional structure of airborne bird flocks // *Behavioral Ecology and Sociobiology*. 1978. Vol. 4, no. 2. P. 111–122.
20. Cambuí D. S., Rosas A. Density induced transition in a school of fish // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2012. Vol. 391, no. 15. P. 3908–3914.
21. Makris N. C. Fish Population and Behavior Revealed by Instantaneous Continental Shelf-Scale Imaging // *Science*. 2006. Vol. 311, no. 5761. P. 660–663.
22. Individual decisions, traffic rules, and emergent pattern in schooling fish // Animal Groups in Three Dimensions / Ed. by J. K. Parrish, W. M. Hamner. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. P. 126–142. URL: <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9780511601156A066>.

23. Sinclair A. R. E. The African buffalo: a study of resource limitation of populations. Wildlife behavior and ecology. Chicago: University of Chicago Press, 1977. ISBN: 0226760308.
24. Aldana M., Larralde H., Vázquez B. On The Emergence Of Collective Order In Swarming Systems: A Recent Debate // *International Journal of Modern Physics B*. 2009. Vol. 23, no. 18. P. 3661–3685.
25. Toner J., Tu Y. Long-Range Order in a Two-Dimensional Dynamical XY Model: How Birds Fly Together // *Physical Review Letters*. 1995. Vol. 75, no. 23. P. 4326–4329.
26. Bertin E., Droz M., Grégoire G. Boltzmann and hydrodynamic description for self-propelled particles // *pre*. 2006. Vol. 74, no. 2. P. 022101.
27. Makris N. C., Ratilal P., Jagannathan S. et al. Critical Population Density Triggers Rapid Formation of Vast Oceanic Fish Shoals // *Science*. 2009. Vol. 323, no. 5922. P. 1734–1737.
28. Raffel M. *Particle image velocimetry a practical guide*. Heidelberg; New York: Springer, 2007. ISBN: 9783540723080 3540723080 9783540723073 3540723072.
29. Becco C., Vandewalle N., Delcourt J., Poncin P. Experimental evidences of a structural and dynamical transition in fish school // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2006. Vol. 367. P. 487–493.
30. Nagy M., Ákos Z., Biro D., Vicsek T. Hierarchical group dynamics in pigeon flocks // *Nature*. 2010. Vol. 464, no. 7290. P. 890–893.
31. Czirók A., Schlett K., Madarász E., Vicsek T. Exponential Distribution of Locomotion Activity in Cell Cultures // *Physical Review Letters*. 1998. Vol. 81, no. 14. P. 3038–3041.
32. Seuront L. Small-scale turbulence in the plankton: low-order deterministic chaos or high-order stochasticity? // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2004. Vol. 341. P. 495–525.
33. Parisi D. R., Gilman M., Moldovan H. A modification of the Social Force Model can reproduce experimental data of pedestrian flows in normal conditions // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2009. Vol. 388, no. 17. P. 3600–3608.

34. Moussaid M., Helbing D., Theraulaz G. How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2011. Vol. 108, no. 17. P. 6884–6888.
35. Schaller V., Weber C., Semmrich C. et al. Polar patterns of driven filaments // *Nature*. 2010. Vol. 467, no. 7311. P. 73–77.
36. Turgut A. E., Çelikkanat H., Gökçe F., Şahin E. Self-organized flocking in mobile robot swarms // *Swarm Intelligence*. 2008. Vol. 2, no. 2-4. P. 97–120.
37. Blair D., Neicu T., Kudrolli A. Vortices in vibrated granular rods // *Physical Review E*. 2003. Vol. 67, no. 3.
38. Cullen J., Shaw E., Baldwin H. A. Methods for measuring the three-dimensional structure of fish schools // *Animal Behaviour*. 1965. Vol. 13, no. 4. P. 534–543.
39. Lukeman R., Li Y., Edelstein-Keshet L. Inferring individual rules from collective behavior // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2010. Vol. 107, no. 28. P. 12576–12580.
40. Axelsen B., N?ttestad L., Fernö A. et al. Await in the pelagic: dynamic trade-off between reproduction and survival within a herring school splitting vertically during spawning // *Marine Ecology Progress Series*. 2000. Vol. 205. P. 259–269.
41. Nagy M., Daruka I., Vicsek T. New aspects of the continuous phase transition in the scalar noise model (SNM) of collective motion // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2007. Vol. 373. P. 445–454.
42. Kulinskii V. L., Ratushnaya V. I., Zvelindovsky A. V., Bedeaux D. Hydrodynamic model for a system of self-propelling particles with conservative kinematic constraints // *Europhysics Letters (EPL)*. 2005. Vol. 71, no. 2. P. 207–213.
43. Ratushnaya V., Bedeaux D., Kulinskii V., Zvelindovsky A. Collective behavior of self-propelling particles with kinematic constraints: The relation between the discrete and the continuous description // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2007. Vol. 381. P. 39–46.
44. Vicsek T. Phase transitions and overlapping modules in complex networks // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2007. Vol. 378, no. 1.

- P. 20–32.
45. Chepizhko O., Kulinskii V. The microscopic phase density functional approach to the construction of the kinetic and hydrodynamic description for the system of self-propelled particles // [arXiv preprint arXiv:1304.6645](#). 2013.
 46. Kulinskii V., Chepizhko A. On the relation between Vicsek and Kuramoto models of spontaneous synchronization. 2014.
 47. Baglietto G., Albano E. Finite-size scaling analysis and dynamic study of the critical behavior of a model for the collective displacement of self-driven individuals // [Physical Review E](#). 2008. Vol. 78, no. 2.
 48. Kulinskii V. L., Chepizhko A. A. The kinetic regime of the vicsek model // [arXiv preprint arXiv:0910.5707](#). 2009.
 49. Kulinskii V., Chepizhko O. [Self-propelling particles as a new challenge for nonequilibrium statistical mechanics](#). 2012. URL: <http://www.complexfluids.ethz.ch/CONF/g/SLIDES/Kulinskii..pdf>.