

## "УТВЕРЖДАЮ"

Директор Самарского филиала  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Физического института им П.Н.  
Лебедева Российской академии наук  
(СФ ФИАН)



В.Н. Азязов

2022 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Самарского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (СФ ФИАН)

Диссертация Белова Сергея Александровича «Влияние теплового дисбаланса на свойства и динамику МГД волн в магнитоструктурированной плазме и нелинейные волновые взаимодействия» по специальности 1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы, представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, выполнена в Самарском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им П.Н. Лебедева Российской академии наук (СФ ФИАН) и федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва» (Самарский университет).

Соискатель, Белов Сергей Александрович, 1994 года рождения, в 2018 году окончил с отличием факультет информатики Самарского университета по направлению – «Прикладные математика и физика». В период подготовки диссертации с 2018 года по 2022 год обучался в очной аспирантуре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет). С 2017 года работает в СФ ФИАН, в настоящее время в должности высококвалифицированного младшего научного сотрудника теоретического сектора.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, Молевич Нонна Евгеньевна, работает в должности высококвалифицированного главного научного сотрудника, и.о. зав. теоретическим сектором СФ ФИАН и, по совместительству, в должности профессора кафедры физики Самарского университета.

По результатам рассмотрения диссертации Белова С. А. «Влияние теплового дисбаланса на свойства и динамику МГД волн в магнитоструктурированной плазме и нелинейные волновые взаимодействия», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы, на заседании Ученого Совета СФ ФИАН (протокол №7 от 29 июня 2022 года) принято следующее заключение.

#### 1. Оценка выполненной соискателем работы

Диссертационная работа является *завершенной*.

Тема диссертационной работы признана *актуальной*. Актуальность темы определяется возросшим интересом к исследованию распространения МГД волн в атмосфере Солнца, обусловленным развитием наблюдательных средств космического базирования. В частности, существует большой пласт наблюдений, которые интерпретируют, как распространяющиеся или стоячие магнитоакустические волны. Кроме того, в настоящее время имеются наблюдательные свидетельства распространения альфвеновских волн в солнечной атмосфере.

Для успешного описания линейной и нелинейной динамики наблюдаемых волн необходимо учитывать наиболее важные физические процессы, происходящие в среде. Одним из таких процессов является тепловой дисбаланс между радиационным охлаждением и нагревом короны, характерные времена которого, как показывают недавние исследования, могут совпадать по величине с периодами наблюдаемых волн.

Воздействие теплового дисбаланса на магнитоакустические волны приводит к их дисперсии и усилению либо затуханию, однако не оказывает никакого эффекта на альфвеновские волны в линейном приближении. Процессы нелинейного взаимодействия между альфвеновскими и магнитоакустическими волнами в средах, где возможно возникновение теплового дисбаланса, в данный момент являются недостаточно изученными. Кроме того, мало внимания уделено также совместному влиянию теплового дисбаланса и магнитной структурированности на свойства и динамику наблюдаемых волн, хотя подобное влияние может значительно сказываться на дисперсии наблюдаемых волн.

В диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Определить и проанализировать закономерности квазирезонансного трехволнового взаимодействия между сдвиговыми альфвеновскими и МА волнами в плазме с тепловым дисбалансом и для свинг-волнового взаимодействия между сдвиговой альфвеновской волной и стоячей быстрой МА волной в плазме с тепловым дисбалансом и конечной электрической проводимостью.
2. Исследовать процесс распространения нелинейных сдвиговых альфвеновских волн в плазме с тепловым дисбалансом, конечной электрической проводимостью, вязкостью и теплопроводностью.
3. Получить дисперсионное соотношение и построить дисперсионные кривые для медленных магнитоакустических волн, распространяющихся в корональных петлях в приближении тонкой трубки второго порядка.
4. Найти выражения для величины продольного возмущения плазмы, индуцированного крутильными альфвеновскими волнами в плазме с тепловым дисбалансом.

2. **Достоверность** полученных автором результатов подтверждается физической адекватностью использованных аналитических моделей, сравнением с известными теоретическими результатами и результатами численного моделирования.

3. **Диссертация соответствует** п. 5 «Течения сжимаемых сред и ударные волны», п. 9 «Физико-химическая гидромеханика (течения с химическими реакциями, горением, детонацией, фазовыми переходами, при наличии излучения и др.)», п. 14 «Гидродинамическая устойчивость», п. 15 «Линейные и нелинейные волны в жидкостях и газах», п. 17 «Гидромеханика сред, взаимодействующих с гравитационным и электромагнитным полями. Динамика плазмы» областей исследования паспорта **специальности 1.1.9.** – Механика жидкости, газа и плазмы.

4. В рамках диссертационной работы получены результаты, обладающие **научной новизной и выносимые на защиту:**

1. Режимы коллинеарного квазирезонансного параметрического взаимодействия акустической волны с двумя альфвеновскими волнами в плазме с тепловым

дисбалансом и условия их реализации в зависимости от величины отстройки частоты, включающие биэкспоненциальное усиление альфвеновских волн, параметрическую модуляцию альфвеновских волн, а также двухэтапный режим. Пороговое условие параметрического распада акустической волны. Биэкспоненциальное усиление альфвеновских волн в результате свинг-волнового взаимодействия со стоячей быстрой МА волной в плазме с тепловым дисбалансом и конечной электрической проводимостью.

2. Выражения для возмущений плазмы, индуцированных сдвиговой альфвеновской волной в плазме с тепловым дисбалансом, конечной электрической проводимостью, вязкостью и теплопроводностью, включающие выражение для экспоненциального сдвигового потока. Система укороченных уравнений, описывающая процесс самовоздействия сдвиговых альфвеновских волн в плазме с тепловым дисбалансом, конечной электрической проводимостью, вязкостью и теплопроводностью. Результаты численного решения данной системы для условий солнечной атмосферы. Характерные времена укрупнения и изменения амплитуды альфвеновских волн в результате самовоздействия. Оценки данных времён для условий солнечной атмосферы.
3. Дисперсионное соотношение, описывающее влияние теплового дисбаланса на магнитоакустические волны, распространяющиеся в магнитных трубках, в приближении тонкой трубки второго порядка. Аналитическое решение дисперсионного соотношения для распространяющихся медленных МА волн. Дисперсионные кривые для условий веерных корональных петель.
4. Выражения для возмущений плазмы, индуцированных крутильными альфвеновскими волнами в плазме с тепловым дисбалансом, и их оценки для условий солнечной короны.

#### **5. Полнота изложения результатов работы в публикациях.**

Соискатель имеет 35 опубликованных работы по теме диссертации, в том числе: 12 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией, включая высокорейтинговые журналы WoS и Scopus (7 статей Q1, Q2), 23 статьи в сборниках трудов конференций и тезисов докладов, и 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Опубликованные работы достаточно полно отражают содержащиеся в диссертации научные результаты, а также основные аспекты их практического применения. Все результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично, либо при его определяющем личном участии.

Работы, опубликованные в ведущих международных и Российских журналах, приведены в списке:

1. Белов С. А. Усиление альфвеновских волн в результате нелинейного взаимодействия с быстрой магнитоакустической волной в акустически активной проводящей среде / С. А. Белов, Н. Е. Молевич, Д. И. Завершинский // Письма в ЖТФ. – 2018. – Т. 44. – №. 5.
2. Белов С. А. Усиление альфвеновских волн в результате параметрического взаимодействия с изоэнтропически неустойчивыми магнитоакустическими волнами / С. А. Белов, Н. Е. Молевич, Д. И. Завершинский // Физическое образование в ВУЗах. – 2018. – Т. 24. – №. 1S. – С. 5с-7с.
3. Белов С. А. Усиление альфвеновских волн в результате параметрического квазирезонансного взаимодействия с магнитоакустическими волнами в тепловыделяющей изоэнтропически неустойчивой плазме / С. А. Белов, Н. Е. Молевич, Д. И. Завершинский // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2019. – Т. 62. – №. 2. – С. 3-8.
4. Belov, S. A. Propagation of nonlinear Alfvén waves in heat-releasing plasma / S. A. Belov, N. E. Molevich, D. I. Zavershinskii // Physica Scripta. – 2019. – Vol. 94. – №. 10. – P. 105605.

5. Белов С. А. Самовоздействие альвеновских волн в плазме с тепловым дисбалансом / С. А. Белов, Н. Е. Молевич, Д. И. Завершинский // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2020. – Т. 63. – №. 9-10. – С. 771-780.
6. Belov, S. Thermal misbalance influence on the nonlinear shear Alfvén waves under solar atmosphere conditions / S. Belov, N. Molevich, D. Zavershinskii // Solar Physics. – 2020. – Vol. 295. – №. 11. – P. 1-19.
7. Belov, S. Longitudinal Plasma Motions Generated by Shear Alfvén Waves in Plasma with Thermal Misbalance / S. Belov, S. Vasheghani Farahani, N. Molevich, D. Zavershinskii // Solar Physics. – 2021. – Vol. 296. – №. 6. – P. 1-12.
8. Belov, S. A. Dispersion of Slow Magnetoacoustic Waves in the Active Region Fan Loops Introduced by Thermal Misbalance / S. A. Belov, N. E. Molevich, D. I. Zavershinskii // Solar Physics. – 2021. – Vol. 296. – №. 8. – P. 1-13.
9. Zavershinskii, D. I. Nonlinear magnetoacoustic waves in plasma with isentropic thermal instability / D. I. Zavershinskii, N. E. Molevich, D. S. Riashchikov, S.A. Belov // Physical Review E. – 2020. – Vol. 101. – №. 4. – P. 043204.
10. Agapova, D. Dynamics of fast and slow magnetoacoustic waves in plasma slabs with thermal misbalance / D. Agapova, S. Belov, N. Molevich, D. Zavershinskii // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2022. – Vol. 541. – №. 4. – P. 5941–5951
11. Belov, S. Propagating torsional Alfvén waves in thermally active solar plasma / S. Belov, S. Vasheghani Farahani, N. E. Molevich // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2022. – Vol. 515. – №. 4. – P. 5151-5158.
12. Молевич Н. Е. Фазовый сдвиг между возмущениями температуры, давления и плотности в тепловыделяющей среде / Н. Е. Молевич, Д. С. Рящиков, Д. И. Завершинский, С. А. Белов // Краткие сообщения по физике. – 2022. – №. 9. – С. 19-26.

6. **Апробация работы** регулярно проводилась на научных семинарах СФ ФИАН, а также на следующих научных конференциях и семинарах:

- Научном семинаре СФ ФИАН – ФИАН – Самарского университета «Исследование процессов, происходящих на Солнце, с помощью наноспутников» (2019),
- 12-17 ежегодных конференциях «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, 2017-2022),
- Научных школах «Нелинейные волны» (Нижний-Новгород, 2018, 2020),
- Конференции-конкурсе молодых физиков (Москва 2018),
- Третьей и Четвертой Российских конференциях по магнитной гидродинамике (Пермь, 2018, 2021),
- The 31<sup>st</sup> International Symposium on Shock Waves (Япония, Нагоя, 2017),
- 25 International Congress on Sound and Vibration (Япония, Хиросима, 2018),
- 8<sup>th</sup> International Symposium on Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics (Ирландия, Лимерик, 2019),
- Международном онлайн-семинаре «Effects of Coronal Heating/Cooling on MHD Waves» (Великобритания, Уорвик, 2021-2022),
- Международной Байкальской молодежной научной школе по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде» (Иркутск, 2022).

7. **Теоретическая и практическая ценность работы** соискателя состоит в том, что в диссертации впервые исследован вопрос о влиянии теплового дисбаланса на

распространение нелинейных альфвеновских волн в плазме с тепловым дисбалансом, а также о совместном влиянии теплового дисбаланса и магнитной структурированности на дисперсию медленных магнитоакустических волн. Представленные результаты могут быть использованы для определения свойств среды, например, параметров обобщенной функции тепловых потерь, по наблюдениям структур, формирующихся в тепловыделяющих средах, а также для разработки методов детектирования альфвеновских волн в солнечной короне.

Диссертация Белова Сергея Александровича «Влияние теплового дисбаланса на свойства и динамику МГД волн в магнитоструктурированной плазме и нелинейные волновые взаимодействия» четко структурирована, написана понятным и грамотным языком, хорошо оформлена, является завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение ряда задач, имеющих существенное значение для магнитогидродинамики тепловыделяющих сред. Рекомендуются к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы.

Заключение принято на заседании Учёного Совета Самарского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Присутствовало на заседании членов Ученого совета СФ ФИАН. Результаты голосования: «за» - 9 чел., «против» - 0 чел., «воздержались» - 0 чел., протокол № 7 от 29 июня 2022 г.

И.о. учёного секретаря СФ ФИАН, к.ф.-м.н.



А.М. Майорова