Турбулентность низкотемпературной плазмы: фундаментальные результаты и нерешенные проблемы

1,2Сон Э.Е.

1Объединенный институт высоких температур РАН  
2Московский физико-технический институт, [son.eduard@gmail.com](mailto:son.eduard@gmail.com)

Низкотемпературная плазма (НТП) представляет собой область, в которой как правило, давление и температура (по крайней мере электронная), достаточно высоки, так что коллективные процессы проявляются не столь существенно, как в высокотемпературной плазме, где самосогласованные электромагнитные поля определяют динамику заряженных частиц. Особенности низкотемпературной плазмы проявляются в высокой скорости реакций, равновесие в которых может быть сильно сдвинуто вследствие неравновесности плазмы, неаррениусовском поведении скоростей реакций вследствие обогащения «хвоста максвелловского распеделения» при вводе электронного пучка в плазму, приводящего к сложному плазмохимическому составу, образованию активных радикалов, неидеальности. В приложениях плазмы наиболее эффективными являются проточные реакторы с большими скоростями потоков НТП, к ним относятся плазменные реакторы, плазменные ускорители и ракетные двигателях. Одной из центральных проблем в этих системах является плазменная турбулентность, перезамыкание как гидродинамическое, так и магнитное. НТП возникает в задачах входа в плотные слои атмосферы, используется в методах управления плазменными потоками электромагнитными полями. По изложенным причинам природа турбулентности НТП состоит в нескольких типах турбулентного движения – во первых, это гидродинамическая турбулентность в среде с объемными силами и энергвыделением, к которым относятся помимо гравитационной, сила, действующая на объемные заряды, во- вторых, сила Ампера со стороны магнитного поля. В третьих, джоулево энерговыделение наряду с высокими температурами и развитием плазмохимических неустойчивостей и горением, переходящих в турбулентность, проявляется в различных наблюдаемых явлениях. В приближении магнитной гидродинамики (МГД-приближение) можно пренебречь объемными зарядами и задача турбулентного движения сводится к самосогласованной системе уравнений для движения среды и индуцированного магнитного поля. Взаимодействие этих полей определяется магнитным числом Рейнольдса (, при малых Rem уравнения для пульсаций магнитного поля являются линейными по пульсациям скоростей и задача о влиянии магнитного поля на турбулентное сопротивление решена как экспериментально, так и теоретически. При больших магнитных числах Рейнольдса задача становится нелинейной, но она может быть решена с помощью преобразования Эльзассера, при этом получается система уравнений аналогичная уравнениям Рейнольдса, но содержащая моменты не только пульсаций скорости, но и пульсации альфвеновских скоростей и дополнительную омическую диссипацию. Для решения совместной системы уравнений предложены методы аналогичные RANS, URANS, LES, DNS, соответственно, обозначенные MRANS, MURANS, MLES, MDNS. Следующей рассмотренной задачей является однородная изотропная турбулентность и ее модификация для случая неизотропной МГД – турбулентности. Успехи в развитии вычислительной техники, методов численного моделирования и средств диагностики дают возможность переосмысления классических результатов, формулировки нерешенных проблем и применения методов и теории к описанию неклассических направлений турбулентных течений, таких как воздействие внешних объемных сил гравитационной и электромагнитной природы, многофазных сред, протекания химических реакций и горения, влияние излучения, сверхзвуковых и гиперзвуковых потоков на турбулентность и обратного влияния турбулентности на неклассические турбулентные течения. В докладе рассмотрены турбулентные течения, начиная с простейшей двумерной турбулентности, в этом случае основные результаты при достаточно высоких числах Рейнольдса получены на основе низкодиссипативных численных методов. Полученные результаты явились основой построения теории турбулентности для двумерных течений и обобщения на трехмерные течения. Рассмотрены спектры турбулентности и получены результаты для ряда задач неклассической турбулентности. В докладе также представлены результаты по квантовой турбулентности, спектрам и обсуждаются проблемы диссипации в квантовой турбулентности и применимость теории Колмогорова к квантовой турбулентности.

Литература.

1. Сон Э.Е. Турбулентность низкотемпературной плазмы. Энциклопедия низкотемпературной плазмы, серия Б, тематический том III-3, М.: «Янус-К» С.125-151. 2013 г.
2. Y. M. Kulikov and E. E. Son. Stability of Thermoviscous Fluid Flow Under High Temperature Gradients. High Temperature, 2017, Vol. 55, No. 1, pp. 131–138. **DOI:** 10.1134/S0018151X17010254
3. Son E.E.. Quantum Gases Hydrodynamics Experiments at ISS, 2017 NASA Fundamental Physics Workshop on May 31 – June 2, Santa Barbara, 2017. <http://www.cvent.com/events/nasa-fundamental-physics-workshop-2017/custom-17-1c3c1c6045454b62a06ade28bab57cb1.aspx>
4. Дегтярь В.Г., Сон Э.Е. Гиперзвуковые летательные аппараты. Изд. Янус-К. т.1.980 с. 2016 г, т.2. 850 с. 2017 г.