

# **АЛЕКСАНДР СТЕПАНЕНКО: «ПЛАЗМА — УДИВИТЕЛЬНЫЙ ОБЪЕКТ»**

**07 августа 2024**

Будущее термоядерной энергетики во многом зависит от понимания процессов, происходящих в возникающей внутри реакторных установок раскаленной плазмы. Об исследованиях в этой сфере мы беседуем с доцентом кафедры физики плазмы НИЯУ МИФИ, старшим научным сотрудником лаборатория «Физико-химические процессы в стенках термоядерных установок» Института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ Александром Степаненко.

## **Наука о плазме**

**Александр Александрович, какова тема ваших научных исследований?**

Основная тема связана с анализом турбулентной динамики пристеночной плазмы токамака. А еще есть задачи, связанные с моделированием плазменных двигателей, и задача, которой я занимаюсь для Объединенного института ядерных исследований в Дубне. Все они связаны с изучением движения плазмы.

**Можно кратко охарактеризовать какие задачи стоят перед исследователями плазмы?**

Если говорить глобально, то наука, связанная с исследованием динамики плазмы, делится на два больших направления. Одно направление связано с исследованием макроскопического движения плазмы как сплошной среды в заданной конфигурации электрических и магнитных полей, а другое направление - с исследованием того, какие неустойчивости могут развиваться в плазме. Плазма — удивительный объект, который, в отличие, от жидкости, проявляет широкий спектр неустойчивостей. То, как, заряженные частицы взаимодействуют друг с другом и как они взаимодействуют с магнитными и электрическими полями, приводит к тому, что в плазме могут самопроизвольно развиваться колебания, волны, которые затем начинают взаимодействовать уже друг с другом - это приводит к образованию так называемой турбулентности. А турбулентностью занимаются уже два столетия, это одна из нерешенных классических задач физики.

**По вашему мнению, анализ динамики плазмы – это скорее теоретическая или экспериментальная наука?**

Здесь стыкуется очень много вопросов, это и эксперимент, это и теория, это и моделирование. Без эксперимента невозможно получить реальные данные о том, как ведет себя плазма. Любое моделирование даст лишь то, что в него заложено. Если изначальные предпосылки где-то некорректны или неверны, то и результат тоже будет неверным. Поэтому мы всегда должны соотносить свои результаты с тем, что получается в эксперименте.

**А какой главный источник экспериментальных данных для вашей научной группы?**

Это данные с магнитных зондов, зондов Ленгмюра, спектроскопические данные с действующих установок. Например, в Курчатовском институте, в течение длительного времени работал токамак Т-10. Некоторое время назад он был демонтирован, и был введен в строй новый токамак Т-15МД, который вот-вот начнет работать.



*Токамак Т-15МД. Фото ГКМП*

***Как вы считаете?***

**За то время, что вы занимаетесь этой проблемой - видите ли вы, что на методы ее исследования влияет развитие компьютерной техники, появление более мощных компьютеров?**

Конкретно на исследования турбулентной динамики плазмы развитие компьютерных методов оказало очень большое влияние. На сегодняшний день методов, которые бы позволяли в общем виде решить уравнения движения плазмы, и получить на листе бумаги все интересующие нас параметры турбулентного переноса, к сожалению, не существует. Существуют методы и подходы, которые используются, например, при анализе так называемой слабой турбулентности, но теории сильной турбулентности, которая бы позволяла количественно предсказывать, что мы получим такие-то результаты, на сегодняшний день нет. И единственным инструментом, который позволяет заглянуть внутрь плазмы и посмотреть, каким образом происходит формирование именно таких, характерных для данной установки турбулентных течений - это именно методы компьютерного моделирования.

Характерной особенностью турбулентности плазмы является многомасштабность. Свой вклад в установление турбулентных течений вносят процессы, чьи скорости и времена протекания могут различаться на многие порядки. Одни процессы, например, теплопроводностные, могут развиваться на временах порядка миллисекунд, а процессы, связанные с флуктуациями потенциала - десятки микросекунд, у кинетических процессов, связанных с так называемой ларморовской прецессией, временные масштабы еще меньше. И разброс пространственных масштабов точно такой же. Например, ларморовский радиус может быть порядка, например, сантиметра, а размеры установки — это метры.

Такой разброс масштабов приводит к тому, что численное решение уравнений динамики плазмы, которые содержат в себе механизмы неустойчивости, становится вычислительно сложной. И для того, чтобы посчитать такую задачу за какое-то обозримое время, конечно, необходимо использовать суперкомпьютерные вычисления.

**Тех компьютерных мощностей, которые имеются в распоряжении. МИФИ, хватает для таких исследований?**

Хватает. Нам очень повезло, мы начинали деятельность, когда в МИФИ создавалась лаборатория взаимодействия плазмы с поверхностью, в рамках этой деятельности был выигран мегагрант на создание такой лаборатории, и часть средств этого гранта пошла на приобретение компьютерного кластера.

## *Кто это делает?*

### **Наверное, в России не только МИФИ занимается этой проблемой?**

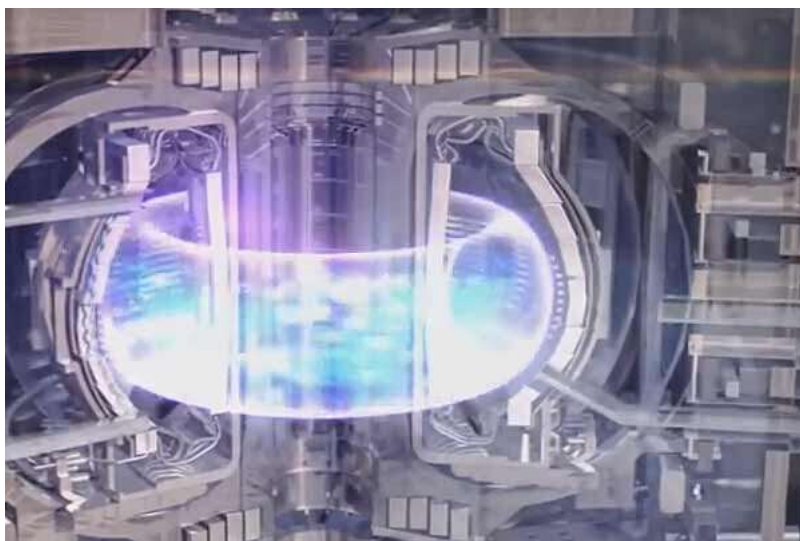
В России я бы выделил четыре главных научных центра, занимающихся проблемами динамики термоядерной плазмы. Первый центр — это Санкт-Петербургский политех, группа профессора **Владимира Рожанского**. Это очень большая и известная группа. Профессор Рожанский — это один из ведущих специалистов в области динамики пристеночной плазмы, прежде всего в вопросах транспорта плазмы, работы с кодом SOLPS. Этот код является основным инструментом, который сегодня используется для моделирования динамики плазмы в токамаках.

Вторая группа работает в Курчатовском институте, который исторически концентрировал исследования в сфере физики плазмы, и вообще термояда. К сожалению, в 90-е годы, с распадом Союза и резким ухудшением условий работы, многие талантливые и мощные теоретики покинули страну. В частности, например, один из моих старших коллег профессор **Сергей Крашенинников**, который сейчас работает в Соединенных Штатах. До недавнего времени в Курчатовском институте работал **Андрей Серафимович Кукушкин** - человек, который фактически стоял у истоков кода SOLPS, и благодаря его работе в проекте ИТЭР этот код был существенно модернизирован. Это один из ведущих специалистов по использованию этого кода для моделирования токамачной плазмы. К сожалению, Андрей Серафимович несколько лет назад ушёл из жизни. Тем не менее, Курчатовский институт и сейчас - мощный центр теории, в том теории турбулентной плазмы, теории процессов переноса, транспорта плазмы.

Третья группа - наша группа в МИФИ. Здесь два ведущих сотрудника - я и **Евгений Маренков**, который тоже работает с кодом SOLPS, и закрывает очень перспективное и интересное направление, связанное с анализом работы токамаков с жидкометаллической стенкой. До недавних пор с нами работал **Андрей Пшенов**, ученик Андрея Серафимовича Кукушкина, но несколько лет назад он получил предложение работы от ИТЭР и уехал во Францию.

И четвёртая группа исследователей находится в Новосибирске. Исторически там была сформирована очень сильная команда теоретиков, можно вспомнить, академика **Дмитрия Рютова**. Там есть направления, которые занимаются суперкомпьютерными вычислениями, но, главное, что в Новосибирске есть линейные установки, которые конструировались еще на заре создания

новосибирского академгородка, так что линейные установки у них фактически магистральное направление.



### ***Загадки плазмы***

**Можно ли более или менее популярной охарактеризовать наиболее интересные результаты, которые были в этой области получены в МИФИ при вашем участии?**

У меня большой блок работ был посвящён исследованию движения филаментарных структур. Дело в том, что развитие турбулентности пристеночной плазмы токамака приводит к образованию так называемых тонких токовых филаментов, это вытянутые вдоль линий магнитного поля трубочки, заполненные плазмой. Поверхность пристеночной плазмы «кипит», и на ней образуются тонкие вытянутые структуры, которые затем отрываются от основной плазмы и начинают двигаться на стенку установки. Я занимался исследованием движений таких структур.

**А почему они движутся, их что-то притягивает?**

Дело не в этом. Неоднородность плазмы автоматически приводит к пространственному разделению зарядов в среде и образованию локальных электрических полей. А это, в свою очередь, приводит к тому, что плазма выталкивается дальше за счёт дрейфа. В этом направлении удалось получить интересные результаты, в частности были определены режимы электромагнитного переноса, когда происходит перескок с электростатического на

электромагнитный режим движения филаментов. До недавнего времени исследования турбулентности пристеночной плазмы отталкивались от так называемых электростатических моделей. Считалось, что температура пристеночной плазмы небольшая, и плазменный параметр  $\beta$  — это отношение газокINETического давления к давлению магнитного поля — имеет небольшие значения, а значит, можно использовать электростатическое приближение. Но оказалось, что даже несмотря на то, что  $\beta$  может быть мало, в достаточно горячей плазме становится важным эффект вмороженности магнитного поля в хорошо проводящую плазму, что приводит к изменению режима переноса филаментов. А там дальше начинаются очень интересные эффекты, связанные с тем, что филаменты становятся фактически источниками радиоволн.

### **Как антенны?**

Да, эта антенна излучает волны, они бегут вдоль филамента, и становится важна физика взаимодействия волн со стенками установки, там, где филамент начинает касаться стенок, когда он попадает в пристеночную область токамака. До сих пор этот эффект никто не принимал внимания, считая, что его вклад очень небольшой. Но оказалось, что если учесть взаимодействие электромагнитных волн со стенкой, то обнаруживается, что генерируемые в горячей плазме электромагнитные волны не затухают, что, в свою очередь, приводит к тому, что турбулентность начинает как бы дышать, а трубочки-филаменты начинают волнообразно, то в одну сторону, то в другую сторону, «вперёд-назад» двигаться к стенке. За счёт этого увеличивается вклад электромагнитных эффектов в турбулентный перенос, что должно привести к изменению параметров самого переноса с увеличением мощности установки. Это одна из групп вопросов, которые мне бы очень хотелось исследовать дальше.

Другой результат связан с экспериментальными наблюдениями, которые были сделаны, например, на токамаке ASDEX. Современные токамаки должны работать в режиме детачмента, когда внутри установки образуется холодная плазма, которая экранирует стенки установки от потоков горячей плазмы из центральной области токамака. Детачмент — это краеугольный камень для того, чтобы создать большую термоядерной установку. Интересно, что когда токамак начинает переходить к детачменту, то есть к образованию подушки из холодной плазмы вблизи стенок токамака, в плазме установки могут возникнуть специфические неустойчивости.

На токамаке ASDEX, потом на токамаке DIII-D были обнаружены схожие по своим параметрам и условиям возникновения флуктуации. Было обнаружено, что если есть асимметрия в отрыве (детачменте) плазмы между внешним дивертором\* и внутренним дивертором, то в плазме последнего начинается турбулентная активность. Профессором Крашенинниковым было сделано предположение, что развитие этого эффекта может быть связано с возбуждением токово-конвективной неустойчивости. Сама токово-конвективная неустойчивость была открыта академиком Кадомцевым еще в XX веке для газового разряда, но оказалось, что этот механизм может работать и в случае токамачной плазмы. С помощью численных расчетов, которыми я занимался, были изучены параметры флуктуаций, которые возникают за счет такого механизма неустойчивой динамики плазмы.

### *Глядя в будущее*

**Слушаю вас, и у меня возникает вопрос: сможет ли вообще идея токамака, идея термоядерного энергетике пробиться через все сюрпризы, которые таит в себе плазма?**

Я очень на это надеюсь. В рамках существующей концепции токамак должен быть большим, ИТЭР - это совершенно исполинские сооружения. Но у меня есть субъективное ощущение, которое подкреплено соображениями качественного порядка, что, возможно, найдутся механизмы, которые позволят сделать более компактный вариант термоядерного реактора.

\* дивертор — узел токамака, сегмент его вакуумной камеры и первой стенки, куда приходят разомкнутые магнитные силовые линии установки и которая отделяет плазменный шнур от поверхности обращенных к плазме материалов устройства.

*Беседовал Константин Фрумкин, пресс-служба НИЯУ МИФИ*

Источник: официальный сайт НИЯУ МИФИ 07 августа 2024

<https://mephi.ru/press/news/23181>