

Самое опасное заблуждение в термоядерной энергетике

Хотя термоядерная энергетика сейчас, в 2020 году - это область экспериментов, великих надежд и дерзких негодований, не имеющая в данный момент прямого промышленного применения, финансовые вливания в нее превышают любое другое аналогичное направление в науке. Один только ИТЭР (экспериментальный реактор типа токамак на юге Франции) имеет бюджет более 20 миллиардов евро.

Объясняется и оправдывается это тем, что термоядерная энергия - это самая выгодная для человека энергия. 1 грамм дейтерия (изотопа водорода, состоящего из протона и нейтрона) при полном превращении в гелий в ходе цепочки термоядерных реакций теоретически выделяет энергию 571 ГигаДжоуль, или 158 МегаВатт-час. Если принимать в расчет только те реакции, которые легче всего идут в термоядерных реакторах (два ядра дейтерия сливаются в тритий или гелий-3 в равных частях, затем тритий или гелий-3 сливаются с дейтерием с образованием обычного гелия), то 1 грамм дейтерия дает при таком преобразовании 344 ГигаДжоуля, или 95 МегаВатт-час энергии. (Для сравнения - чтобы получить те же 344 ГигаДжоуля, нужно сжечь 7,8 тонны бензина). Сравнимую по порядку величины энергию дают и другие виды термоядерного топлива, такие как смесь дейтерия с тритием или смесь водорода с бором-11.

При этом стоимость термоядерного топлива ничтожна по сравнению со всеми остальными видами. Так, 1 грамм дейтерия (энергетический эквивалент 7,8 тонн бензина, или около 5 тонн бензина при неполном реагировании дейтерия) стоит сейчас 40 центов (рыночная цена дейтерия около 400 долларов за килограмм). Дейтерий есть в морской и океанической воде практически везде. Хотя его доля там составляет около 0,015% (с вариациями), но он достаточно легко отделяется от обычного водорода, и общих запасов хватит человечеству на многие миллиарды лет. Кроме того, дейтерий есть почти везде во Вселенной там, где есть обычный водород, примерно в таких же долях - около 0,01%. Поэтому именно термоядерная энергия является оптимальным средством для остановки климатической и экологической катастрофы на Земле, а также единственным средством для успешной колонизации других планет и звездных систем. При этом безопасность термоядерных реакторов даже без специальных средств гораздо лучше, чем у всех остальных промышленных энергетических установок - при малейшем сбое, аварии, теракте и прочих ЧП термоядерная реакция немедленно и полностью прекращается сама по себе, без вмешательства - из-за снижения вакуума, или магнитного поля, или температуры. Продукт термоядерной реакции - гелий - абсолютно безопасен как для человека, так и для экологии, а исходный дейтерий является нерадиоактивным безопасным элементом.

Неудивительно, что правительства и частные лица в развитых странах тратят немалые средства даже на экспериментальные термоядерные реакторы и разработки: кроме упомянутого ИТЭР с 20-

миллиардным бюджетом, на проект NIF (США) потрачено около 4 миллиардов долларов, проект Wendelstein 7-X (Германия) - около 420 миллионов евро, проект Tri Alpha Energy (США) - около 500 миллионов долларов, проект NSTX-U (США) - около 100 миллионов долларов и так далее. В мире существует множество частных и государственных экспериментальных термоядерных реакторов различных конструкций, выданы сотни патентов, например, только установок типа токамак построено более 300. Каждый такой проект надеется на то, что именно он рано или поздно выйдет на промышленные параметры и станет основой энергетики будущего.

Однако, в последнее время раздаются все больше скептических и даже негодующих голосов: "все эти вложения и трата сил напрасны, никакого реального результата для людей термоядерная энергетика не дала и не даст". Причиной этого стало то, что несколько раз ученые и менеджеры от науки публично пообещали людям, что через определенное время будет создан промышленный термоядерный реактор, соответственно решатся все проблемы энергетики и экологии, но их обещания не были выполнены. Например, в 1950-х годах, после изобретения токамака и стелларатора, советские ученые обещали термоядерную энергетiku через 30 лет. Как видим, ни в 1980-х, ни позже ничего подобного не наблюдается. Более свежий пример - в 2014 году представитель одной из крупнейших мировых компаний ВПК с триллионными оборотами заявил, что прототип компактного термоядерного реактора будет создан до 2019 года. Однако, в 2019 году оказалось, что промышленного прототипа нет, а заявленные размеры нужно увеличить во много раз.

Людей шокирует и озлобляет не столько факт отсутствия дешевой чистой энергии, а то, что видные ученые, академики, уважаемые люди обещают, но их обещания остаются словами. И это понятно. Поэтому надо объяснить причину подобных обещаний и причину их краха.

Самое опасное заблуждение в сфере термоядерной энергетики состоит в том, что многие ученые (к счастью, не все), а вместе с ними и другие не совсем ученые люди, полагают, что процессы в термоядерной плазме и в термоядерном реакторе можно предсказать каким-то образом - путем математических вычислений, или вычислений на компьютере. Причем предсказать настолько, что можно вычислить энергетическую эффективность термоядерного реактора - сколько он требует энергии для своей работы и сколько он будет производить в результате термоядерной реакции. Именно на таких вычислениях основывались обещания физиков, начиная с 1950-х годов и до нашего времени. Но подобные предсказания невозможны в принципе, и вот почему.

Плазма - совокупность электрически заряженных частиц, электронов и ядер (или ионов). На частицу в плазме действуют электрически и магнитно все другие частицы, и кроме этого, внешние магнитные и электрические поля. Полное точное математическое описание плазмы должно включать учет всех этих взаимодействий. Но такое точное описание невозможно в принципе! Задача трех тел - математическое описание движения трех взаимодействующих гравитационно или электрически тел -

не решается методами математики в принципе, это доказали более 100 лет назад математики Брунс и Пуанкаре. Соответственно, не имеет точного математического решения задача описания более трех взаимодействующих тел. Поэтому математически строго плазму описать невозможно в принципе. Попытки пренебречь этим фактом, применив простые приближенные модели к описанию плазмы, потерпели полное фиаско, столкнувшись с так называемыми неустойчивостями плазмы, настойчиво появляющимися в экспериментах, а апофеозом этого и стало невыполнение обещаний, даваемых авторитетными учеными.

Даже наиболее адекватный метод описания плазмы с помощью уравнения Власова, которое учитывает дальнедействующее кулоновское взаимодействие частиц посредством самосогласованного электрического и магнитного поля, неприменим для термоядерной плазмы в большинстве случаев. Во-первых, сама запись уравнения уже предполагает пренебрежение вкладом интеграла столкновений, то есть не является точным решением. Во-вторых, в большинстве случаев термоядерная плазма периодически получает энергию извне и постоянно впитывает дополнительную энергию от внутренних термоядерных реакций, то есть является открытой системой, которая оперирует вдали от термодинамического равновесия, другие названия "неравновесная открытая система" или "диссипативная система". Для таких систем неверна теорема Лиувилля о сохранении объема в фазовом пространстве, следствием которой и является уравнение Власова.

Все это общеизвестные факты, доступные даже в Википедии - https://en.m.wikipedia.org/wiki/Three-body_problem , https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Диссипативная_система . Однако они «скромно» замалчиваются.

Кроме того, невозможно просчитать даже приближенно на суперкомпьютерах поведение термоядерной плазмы с необходимой точностью, чтобы узнать энергетическую эффективность термоядерного реактора. Поскольку сечение термоядерной реакции характеризуется порядком (-28) квадратных метра, то точность вычислений должна превышать 10 в степени минус 14 метра. Чтобы просчитать поведение 1 кубического сантиметра термоядерной высокотемпературной плазмы с приемлемой точностью за время, необходимое для достижения критерия Лоусона (то есть для достижения эффективности энергетического процесса), необходимо сделать, по самым скромным подсчетам, порядка 10 в степени 38 операций с плавающей точкой (в действительности это число на много порядков выше, если учесть квантовый вероятностный характер слияния ядер, действие внешних полей, эффект бабочки для сложных систем и прочее). Такое число операций все компьютеры мира сейчас будут выполнять многие миллиарды лет (если принять общую вычислительную мощность человечества как 10 в степени 21 Флопс - а сейчас самый мощный суперкомпьютер Фугаку в Японии имеет пиковую мощность около 500 ПетаФлопс, то есть половина от 10 в степени 18 Флопс).

Другими словами, предсказание процессов в термоядерной плазме наука неспособна осуществить в принципе. Опасное же заблуждение состоит в том, что отдельные ученые, а вслед за ними и другие люди, в том числе те, которые распределяют общественные и государственные средства, начинают полагать, что их предсказания плазмы, выполненные с помощью тех или иных приближенных методов и вычислений (которые сами по себе безукоризненны), являются истиной и будут подтверждены в эксперименте. Это заблуждение имеет два ужасных для всего человечества следствия. Во-первых, данные физиками на основе их вычислений обещания не выполняются, общество разочаровывается в самой идее термоядерной энергетики и начинает к ней относиться негативно, как к напрасной трате денег налогоплательщиков, тем самым препятствуя своему же спасению и развитию. Во-вторых, и это главное, уверовавшие в истинность своих приближенных вычислений авторитетные ученые продвигают те или иные конструкции термоядерных реакторов как наиболее перспективные, обеспечивают этими приближенными вычислениями и своим авторитетом финансирование их конструкций. При этом они зачастую такими же приближенными вычислениями (выдавая их за истинные и «обязанные подтвердиться») могут, наоборот, тормозить экспериментальную проверку и развитие новых, ранее не проверявшихся конструкций термоядерных реакторов, и лишать эти новые модели финансирования для экспериментов. А ведь решение задачи создания промышленного термоядерного реактора с наибольшей вероятностью находится среди новых, ранее не проверявшихся конструкций - так как экспериментальная работа уже известных моделей типа токамака и стелларатора на протяжении десятков лет показала их неэффективность.

Запуск термоядерной энергетики является жизненно важным вопросом для всего человечества, как для остановки климатической катастрофы, так и для расселения на другие планеты. В этой ситуации тормозить развитие этого направления путем выдавания приближенных расчетов за непогрешимые и априори достоверные - это не просто заблуждение, а какой-то супер-обман, чреватый катастрофой для планеты. И участвуют в этом супер-обмане не только хорошие физики, искренне верящие в достоверность своих вычислений, но и те, кто им верит - публика, инвесторы, налогоплательщики.

Иногда приближенные вычисления заменяются замалчиванием очевидных фактов. Например, для того же ИТЭР афишируется, что «коэффициент усиления мощности равен 10». Наивный обыватель может подумать, что этот реактор способен будет производить электроэнергии в 10 раз больше, чем потребляет. В действительности же 10 – это коэффициент усиления тепловой мощности в плазме, то есть если плазма в реакторе нагревается с мощностью 50 Мегаватт, то в термоядерных реакциях по плану должно выделиться 500 Мегаватт. При этом при переводе этих суммарных 550 Мегаватт в электричество КПД всегда меньше 40%, то есть максимальная электрическая мощность, которую в принципе способен производить ИТЭР – не более 220 Мегаватт. А чтобы для нагрева ввести в плазму 50 Мегаватт, необходимо затрачивать от 110 Мегаватт (минимум, постоянное потребление) до 620 Мегаватт при разогреве плазмы (по данным ИТЭР). При этом средняя потребляемая от мощность ИТЭР, по подсчетам специалистов – около 300 Мегаватт - <https://news.newenergytimes.net/2017/10/06/the-iter-power-amplification-myth/> . То есть по плану потребляет ИТЭР около 300 Мегаватт электроэнергии, а способен по плану произвести не более 220 Мегаватт электроэнергии. Другими словами, при коэффициенте усиления тепловой мощности 10

ИТЭР в принципе не способен производить электроэнергию для сети. Но этот факт, опять же, «скромно умалчивается».

Адекватный и наиболее результативный подход для развития термоядерной энергетики и вывода ее на промышленный уровень следующий. Поскольку точные предсказания для эффективности того или иного типа термоядерных реакторов невозможны в принципе, следует немедленно проверять экспериментально любую новую конструкцию, которая предлагается изобретателями или учеными. Решение может находиться там, где никто не ожидал. Как государственным финансовым фондам, так и частным инвесторам следует учитывать этот факт в первую очередь.

Для оценки того, может ли та или иная новая термоядерная конструкция быть эффективной, следует оперировать самыми базовыми законами сохранения - энергии, импульса, момента импульса - для того, чтобы оценить принципиальную возможность эффективного термоядерного процесса в новом реакторе. Эти расчеты первого приближения имеют смысл и только они могут быть критерием финансирования и экспериментальной проверки. Если же начинают углубляться в расчеты второго, третьего приближения и так далее, используя статистическую физику, уравнение Власова, флюидную модель, модель "частица-в-ячейке" и прочее - в общем случае точность не увеличивается, а уменьшается, погрешность растет, и эксперимент разительно отличается от теории. Это напоминает рассмотрение картины - с расстояния в метр мы видим улыбку Мона Лизы, но если рассмотреть участок картины с расстояния в сантиметр, то можно увидеть только несколько бугорков красок - а улыбка останется невиденной.

Конечно, частные теоретические предсказания определенных процессов в термоядерной плазме имеют ценность - но не для предсказания эффективности процесса в общем, а для описания тех или иных частных процессов в плазме. Например, если теоретически предсказан определенный тип аномальной теплопроводности в плазме, или новый тип переноса ионов, то с большой вероятностью они будут обнаружены в том или ином устройстве, рано или поздно, и такие случаи были. Но нельзя предсказать все явления в плазме и ее поведение в целом. Например, когда в 1982 году Фридрих Вагнер на токамаке ASDEX в Германии обнаружил, что при определенном уровне внешнего нагрева плазмы она внезапно переходит в новое, более устойчивое состояние (называемое H-mode), то это было полной неожиданностью для всех. Хотя сейчас H-mode интенсивно используется в токамаках и стеллараторах, включая ИТЭР, полного теоретического объяснения этого состояния до сих пор нет, хотя частичные описания появляются в 1990-х, 2000-х и 2010-х годах в разных странах.

Принцип необходимой экспериментальной проверки всех возможных типов термоядерных реакторов и даже их частей положен в основу государственной программы правительства США - Program ALPHA ARPA-E. Эта программа финансирует экспериментальные разработки в этом направлении, как частных лиц и компаний, так и научных учреждений. Хотя все новые конструкции в

рамках этой программы проверить невозможно, но в любом случае их наработки рано или поздно будут востребованы.

Если люди будут избегать описанную здесь самую опасную ошибку в термоядерной энергетике, то в ближайшее время будут финансированы и экспериментально проверены все имеющиеся в наличии конструкции термоядерных реакторов с участием их изобретателей и ученых, и вероятность перехода термоядерной энергетике на промышленный уровень намного возрастет. Я пишу - вероятность - поскольку 100% гарантии на достижение промышленного уровня термоядерными реакторами даже в этом случае все равно нет, все из-за той же непредсказуемости термоядерной плазмы. Но есть радостная для всех новость. В случае недостижения термоядерной энергетикой промышленного уровня в ближайшее время самый эффективный экономически и энергетически термоядерный реактор будет востребован и будет работать в промышленности как часть гибридного ядерного реактора. Гибридный реактор - это то, что можно сделать для промышленности уже сейчас. Его принцип - термоядерный реактор (обычно линейной геометрии), окруженный сборкой ядерного топлива из достаточно дешевых Урана-238 или Тория-232, или даже из накопившихся отходов существующих атомных станций. Термоядерный реактор в работе излучает быстрые нейтроны (более 14 МэВ), которые при попадании в ядро Урана-238 или Тория-232 вызывают последующую реакцию деления образовавшегося ядра с выделением энергии около 140 МэВ. Это дает не только источник ядерной энергии с более дешевым и более распространенным, чем Уран-235, топливом, но даже возможность избавляться от накопившихся за десятилетия опасных отходов атомных станций.

Анатолий Харченко.

Дополнительные видео о термоядерной энергетике –

<https://www.youtube.com/watch?v=CbTgdCd7Knw>

<https://www.youtube.com/watch?v=CpqzIFyqI90>