

КАКОЙ ПУТЬ ПРИВЕДЕТ К УПРАВЛЯЕМОМУ ТЕРМОЯДРУ

Андрей ВАГАНОВ

DOI: 10.7868/50233361923030035

В декабре прошлого года Министерство энергетики США на специально созванной пресс-конференции объявило, что ученым Ливерморской национальной лаборатории Лоуренса (LLNL, Калифорния) удалось получить в реакции управляемого термоядерного синтеза 3.15 мегаджоуля (МДж) энергии, затратив на разогрев плазмы 2.05 мегаджоуля. Сообщение об этом достижении физиков стало сенсацией. Эксперимент выполнен учёными Национального комплекса лазерных термоядерных реакций США (National Ignition Facility, NIF). Подчеркивалось, что это первое в истории получение прироста энергии в ходе реакции термоядерного синтеза. “Команда физиков, работающих на установке NIF, провела первый в истории контролируемый эксперимент по термоядерному синтезу, достигнув энергетической безубыточности, это означает, что в результате синтеза было получено больше энергии, чем потребовалось от лазера для его начала”, – указывается в сообщении Министерства энергетики США¹.

Понятно, что без элементов PR здесь не обошлось. Чего-то подобного

следовало ожидать. Но достижение американцев, действительно, весьма важное в физике экстремального состояния вещества. И всё же, в ретроспективе трёх месяцев можно уже более спокойно проанализировать результаты этого уникального физического эксперимента.

* * *

Прежде всего, надо напомнить, что летом 2021 г. учёные и инженеры LLNL уже вплотную подходили к получению прироста энергии в ходе реакции термоядерного синтеза. Согласно пресс-релизу LLNL от 18 августа, в ходе проведённого 8 августа 2021 г. эксперимента на установке NIF, американским исследователям удалось достичь колоссального прогресса, который вплотную приблизил их к решению принципиальной научной задачи – практическому осуществлению так называемого лазерного (инерциального) термоядерного синтеза.

Как заявила тогда Джилл Хруби, заместитель министра энергетики США и главный администратор Национального управления США по ядерной безопасности (NNSA), “эти выдающиеся результаты, полученные на NIF, продвигают вперёд научные знания, от которых зависит модернизация ядерного оружия и производства в NNSA, а также

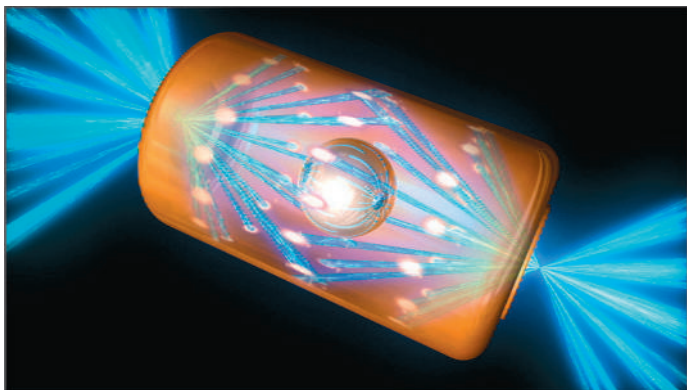
¹ Учёные в Калифорнии добились прорыва в получении энергии из термоядерного синтеза // <https://www.ft.com/content/4b6f0fab-66ef-4e33-adec-cfc345589dc7>

открывают новые направления исследований”².

В результате произведенного на установке NIF очередного мощного “лазерного выстрела” был инициирован “термоядерный взрыв” из топливной капсулы, высвободивший в восемь раз больше энергии, чем в предыдущем рекордном эксперименте (осуществленном ранее в том же году), – 1.35 мегаджоулей. Это, в свою очередь, составило около 70% от исходной энергии лазерного импульса (1.9 МДж). Таким образом, до прошлогоднего достижения физикам из LLNL оставалось сделать всего лишь 30-процентный шаг...

Но в мире существует несколько вариантов проведения управляемой термоядерной реакции. До декабря 2022 г. наиболее перспективной считалась схема, придуманная советскими физиками ещё в начале 1950-х. Аббревиатура этой схемы “ТОроидальная КАмера с МАгнитными Катушками”, токамак, стала уже общепринятым международным термином. На основе принципа токамака строится международный экспериментальный термоядерный реактор ITER во Франции.

Принцип токамака прост: в пустотелом “бублике” (торроидальной камере) зажигается плазменный шнур с температурой в несколько десятков миллионов градусов. Этот плазменный шнур удерживается в сильном, идеально однородном магнитном поле, чтобы не коснуться внутренних стенок тора. Для



*Принцип действия установки лазерного термояда – обжатие сферической капсулы с ядерным топливом лазерными лучами.
(Фото U. S. Department of Energy)*

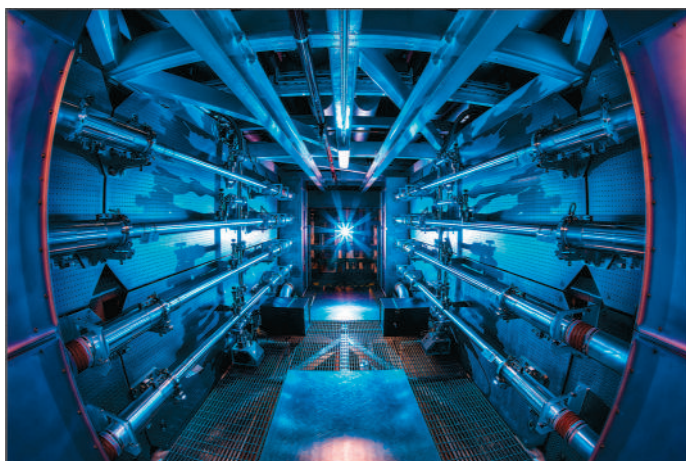
сравнения: температура газа внутри Солнца – 15 млн градусов. Сам принцип удержания миллионноградусного плазменного шнура в магнитном поле предложен в 50-х годах прошлого века выдающимися советскими учёными, академиками Игорем Таммом и Андреем Сахаровым.

В российском токамаке Т-15МД, физический пуск которого в мае 2021 г. прошёл в НИЦ “Курчатовский институт”, общий показатель мощности нагрева составит 11 МВт.

Премьер-министр Михаил Мишустин, который принимал участие в церемонии открытия Т-15МД, заявил: “Это огромное событие не только для России, но и для всего мира. Появляется уникальная инфраструктура для научных исследований для того чтобы, как говорят учёные, управляемый термоядерный синтез все-таки создал неиссякаемый источник энергии. Об этом многие мечтают. Может быть, это удастся вам сделать”.

Увы, пока КПД любых токамаков – отрицательный. То есть энергия, кото-

² Американский прорыв в лазерном термояде // <https://stimul.online/articles/science-and-technology/amerikanskiy-proryv-v-lazernom-termoyade/>



Внутри установки лазерного термоядерного синтеза National Ignition Facility, NIF. (Фото U. S. Department of Energy)

рая затрачивается на разогрев плазмы и удержание её в подвешенном состоянии в магнитном поле, значительно превосходит выход энергии в результате реакции. В 2020 г. на китайском токамаке EAST физикам из Поднебесной удалось удержать 100-миллионноградусный плазменный шнур в течение 100 секунд. Затем сработала аварийная защита.

* * *

Установка NIF принципиально отличается от токамаков. Термоядерная реакция протекает за миллионные доли секунды при сжатии термоядерного топлива – смеси из трития и дейтерия. Для сжатия используют мощные лазеры. Этот принцип создания и поддержания управляемой термоядерной реакции поэтому и называется – “лазерный термояд”, или “инерциальный”.

“Это историческое достижение для исследователей и сотрудников NIF, которые посвятили свои карьеры тому,

чтобы увидеть, как термоядерный синтез становится реальностью, и это достижение, несомненно, повлечёт за собой новые открытия”, – заявила министр энергетики США Дженнифер Грэнхолм³. Рекордный эксперимент обошелся американскому налогоплательщику в 3.5 млрд долларов. Почему так дорого...

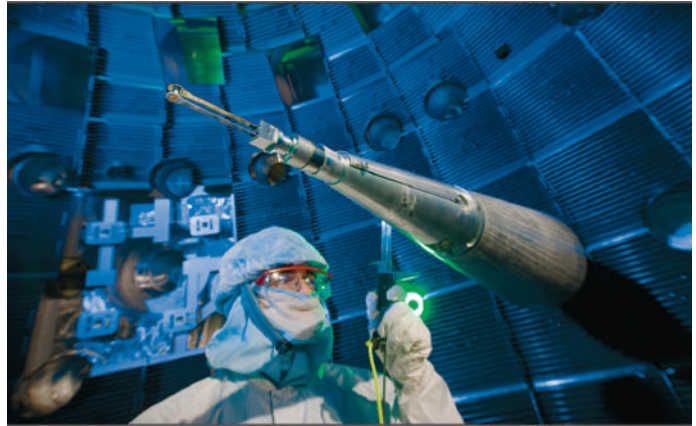
Сердце реактора NIF – 192 мощных лазера, ко-

торые одновременно направляются на миллиметровую сферическую мишень (около 150 микрограммов термоядерного топлива – смесь дейтерия и трития; возможно, в дальнейшем радиоактивный тритий можно будет заменить лёгким изотопом гелия-3, которого так много на Луне). Температура мишени достигает в результате 100 млн градусов, при этом давление внутри шарика в 100 млрд раз превышает давление земной атмосферы. То есть условия в центре мишени даже более экстремальные, чем внутри Солнца.

Плотность лазерного излучения достигает при этом примерно 10^{15} Ватт/см². Энергия самого лазерного луча при этом составляет около 1 МДж. Представьте теперь цепочку падающих в лазерное перекрестье миллиметровых шариков с компонентами термоядерного топлива (фактически, миниатюрных водородных микробомбочек). И, соответственно, непрерывную цепочку микровзрывов...

³ Минэнерго США объявило о получении прироста энергии при термоядерном синтезе // <https://tass.ru/ekonomika/16582969>

Даже сложно вообразить, как физикам удалось достичь синхронности работы этих лазеров и идеально равномерного обжата мишени! Совершенно справедливо администратор Национальной администрации по ядерной безопасности (NNSA) Джилл Хруби назвала проведенный эксперимент "чудом инженерной мысли".



Установка мишени в NIF.
(Фото U. S. Department of Energy)

Но вот придумали такую схему... в СССР. Идея инерциального термоядерного синтеза была сформулирована в 1962 г. академиком Николаем Геннадьевичем Басовым и, тогда ещё не академиком, Олегом Николаевич Крохиным. Басов выступал на сессии Академии наук СССР и определил лазерный термояд как одно из направлений управляемого термоядерного синтеза. Он даже оценил, какой мощности лазер должен быть, чтобы зажечь термоядерную реакцию в этих условиях.

Как раз 13 декабря 2022 г., за день до 100-летнего юбилея Николая Басова, на заседании Президиума Российской академии наук, посвящённом этой дате, академик, заместитель директора Российского федерального ядерного центра "ВНИИЭФ" по лазерно-физическому направлению Сергей Гаранин, подчёркивал: "Фактически достигнуто зажигание термоядерного горючего. Эти результаты, достигнутые на NIF, позволяют сделать вывод о том, что в обозримом будущем идеи Н.Г. Басова о создании термоядерного реактора на базе лазерного термоядерного синтеза вполне реализуемы".

Академик Алексей Хохлов, в своем Telegram-канале выразил солидар-

ность со своим коллегой: «Это выдающийся научный результат, хотя я бы предпочёл, чтобы он появился в научном журнале, а не в объявлении Минэнерго США. Впрочем, не надо переоценивать его немедленную практическую значимость. От этого результата до электростанций, работающих на реакциях термоядерного синтеза – "дистанция огромного размера"».

Вот и директор LLNL Ким Будил считает, что ещё предстоит преодолеть "значительные препятствия" в отношении технологии термоядерного синтеза, прежде чем её можно будет использовать в глобальных масштабах – или для начала в любом масштабе. Такой процесс может занять годы или даже еще несколько десятилетий⁴.

* * *

Слова директора LLNL отнюдь не простая дань скромности. "Инерциаль-

⁴ Американские учёные рассказали, как совершили прорыв в области термоядерного синтеза // <https://overclockers.ru/blog/fantoci/show/81115/amerikanskie-uchenye-rasskazali-kak-sovershili-proryv-v-oblasti-termoyadernogo-sinteza>

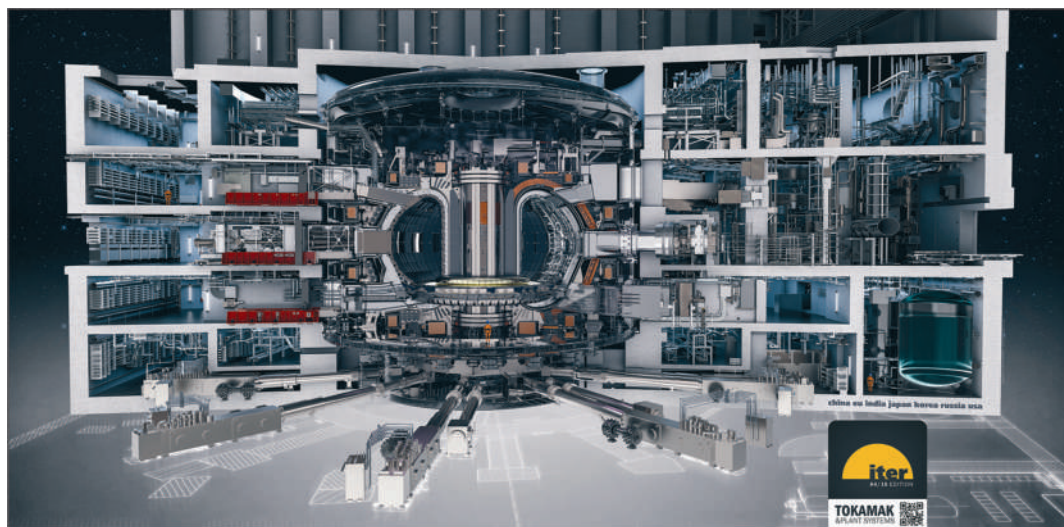


Схема международного исследовательского токамака ITER, строящегося во Франции. (Фото с официального сайта ITER)

ный термояд не войдет в энергетику в ближайшие годы, подчеркнул академик Роберт Нигматулин. – Сейчас нет необходимости в этой супертехнологии. Прежде всего, NIF – это невероятной сложности установка. Например, накопители (конденсаторы) для питания лазеров – это целое футбольное поле. Во-вторых, сейчас уже вполне отработана технология реакторов на быстрых нейтронах. Уран, который эти реакторы позволяют вовлечь в ядерно-топливный цикл, дешёвый, его много.

В общем, физика процесса – интересная: исследование свойств веществ при сверхвысоких давлениях и сверхвысоких температурах; пусть занимаются. Повторяю, это очень интересная физика. Но коммерческое использование этого достижения – не раньше, чем через несколько десятилетий. Как шутят сами физики, занимающиеся термо-

ядом, через пятьдесят лет или, может быть, на два дня раньше”.

Действительно, заявления типа: “Учёные США впервые в мире смогли получить от термоядерного синтеза больше энергии, чем на него потратили”, “Научные прорывы в этой сфере позволят человечеству в будущем полностью отказаться от ископаемого топлива” – существенно переоценивают значение эксперимента на установке NIF. Да, полученной “сверхнормативной” энергии хватит, чтобы вскипятить 10–15 чайников. Но журнал *Nature* напоминает: на работу всей установки потратили 322 МДж; лазеры выдали мощность на топливо равную 2.05 МДж; конечная реакция произвела 3.15 МДж, предыдущий результат.

“То есть именно с точки зрения физики – это действительно успех: получили энергии больше, чем затратили. Но с точки зрения промышленности всё остаётся на своих местах: потратили 322, получили 3,15”, – резюмируют сотрудники Московского инженерно-физического

института в Telegram-канале “Эвтектика из МИФИ”.

Но в этой гонке принципов – токамаки VS инерциальный термояд, как-то оказался отодвинутым на периферию научного (и государственного, что важно) внимания третий вариант: пузырьковый термояд. Любопытно, что этот сценарий зеркально противоположен лазерному термояду. Если в реакторе NIF происходит внешнее обжатие капли термоядерного топлива, то в пузырьковом варианте, наоборот, нейтроны рождаются в результате экстремального схлопывания газовых пузырьков.

Теоретическую схему этого процесса предложил как раз академик Роберт Нигматулин в середине 1990-х. По крайней мере в 1995 г. он уже выступал с докладом “Перспективы пузырькового термояда” на конференции в США. Несколько американских физиков заинтересовались теоретическими выкладками российского учёного и начались “камерные” лабораторные эксперименты.

Принцип пузырькового термояда основан на эффекте акустической кавитации (в специально подготовленной жидкости, подвергнутой воздействию акустической волны, образуется кластер мельчайших пузырьков, которые с огромной скоростью схлопываются). Всё происходило в небольшом цилиндре с ацетоном, в котором ядра водорода были заменены ядрами дейтерия, имеющими в своём составе по дополнительному нейтрону. Учёные зарегистрировали поток нейтронов, вылетающих из камеры, где находился цилиндр с ацетоном. Это и появление ядер трития в облучённом таким образом ацетоне – явные признаки термоядерной реакции.

А в середине нулевых в одном из номеров журнала *Physical Review E* появилось сообщение группы физиков из двух американских институтов (Окриджская национальная лаборатория, штат Теннесси, и Ренселлерский политехнический институт в Трое, штат Нью-Йорк) о том, что им вторично удалось получить доказательства существования звукового термояда. Экспериментаторы бомбардировали цилиндр мощными звуковыми волнами и одновременно – высокоэнергичными нейтронами. В результате рождалось скопление воздушных пузырьков диаметром около миллиметра, то есть гораздо более крупных, нежели образуются при воздействии только звуковых волн. Мощное схлопывание пузырьков нагревало дейтерированный ацетон до таких температур, при которых, утверждают физики, уже начинается термоядерная реакция – слияние двух ядер дейтерия в ядро трития с вылетом лишнего нейтрона⁵.

Кстати, о температурах. Пузырьковый термояд иногда называют “холодным”. Академик Роберт Нигматулин поясняет: «Вообще-то неправильно называть пузырьковый термояд разновидностью “холодного термоядерного синтеза”. В центре пузырька, который испускает нейтроны, температура от 100 до 200 миллионов градусов Кельвина. Процесс длится доли пикосекунды (10^{-12} с), в которые реализуется каждое схлопывание, из каждого пузырька успевает выскочить порядка десятка нейтронов. В общем, получается 500 тысяч нейтронов в секунду. Это – много с точки зрения физики явления, но этого мало, чтобы это было термоядерным реактором».

⁵ Буря в стакане // <http://www.computerra.ru/offline/2004/536/32903/>

Как бы там ни было, по словам Роберта Нигматулина, он продолжает теоретические исследования в этой области и есть идеи, как повысить выход нейтронов в пузырьковом термояде. Нет денег на проведение экспериментов.

Как отмечал польский философ и футуролог Станислав Лем в своём трактате "Сумма технологий" (1964), «Без сомнения, учёным придется сначала "воспитать" целое поколение руководителей, которые согласятся достаточно глубоко залезть в государственный карман, и притом для достижения целей, столь подозрительно напоминающих традиционную тематику научной фантастики». Пузырьковому термояду в этом смысле не повезло: до него додумались, когда основные государственные бюджеты уже были поделены между токамаками и лазерным термоядом.

В любом случае, отметим ещё раз этапный результат учёных, полученный на установке NIF. Пусть и локально, но превышение выработанной энергии над затраченной продемонстрировано экспериментально. Но, вообще-то, результат американских физиков нетривиален не только в отношении физики.

В последние годы общество уже привычно принимает за данность, что современная Большая Наука – это дело больших международных проектов и коллабораций (Megascience). Большой адронный коллайдер (LHC) в Европейском центре ядерных исследований в Женеве, токамак ITER во французском Кадараше, пуск которого всё откладывается и откладывается... Но вот, оказывается, что национальные исследовательские проекты и программы в каком-то смысле могут быть более эффективны.



издательство
НАУКА
— 1727 —
**ЭКСКЛЮЗИВНЫЙ
ПЕРЕПЛЕТ**

Рисунок на коже
Все виды тиснения
Кожаный переплет
Рельефное тиснение
Клише любой сложности
Полноцветная роспись обрешотки
А также адресные папки, дипломы, футляры

Беремся за работы любой сложности!
По всем интересующим вопросам пишите на почту isinityn@tnauka.ru

реклама