

СОЗДАТЕЛЬ ТОКАМАКА

Доктор физико-математических наук
Вячеслав СТРЕЛКОВ,
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт» (Москва)

В феврале 2012 г. термоядерное сообщество страны отметило 100-летие со дня рождения доктора технических наук Натана Явлинского — выдающегося ученого, инженера и организатора науки, одного из тех, кто стоял у истоков новаторского направления — управляемого термоядерного синтеза (УТС), основанного на концепции тороидальных установок для магнитного удержания плазмы (токамаков), предложенной в 1951 г. академиками Игорем Таммом и Андреем Сахаровым. Она получила развитие в Лаборатории измерительных приборов АН СССР (ныне НИЦ «Курчатовский институт»), возглавляемой академиком Игорем Курчатовым. Натан Мудрый (Курчатов часто называл Явлинского именем главного героя известной драмы немецкого классика Готхольда Лессинга) трудился там с 1949 г. до гибели в авиационной катастрофе в 1962 г., где руководил большим научным коллективом, выполнявшим пионерские работы по физике плазмы.

Явлинский родился 13 февраля 1912 г. в семье врача. По правилам тех лет после школы он как сын интеллигента должен был прежде получить рабочую специальность, а потом высшее образование. Окончив в 1931 г. фабрично-заводское училище при

Харьковском электромеханическом заводе, молодой рабочий «без отрыва от производства» поступил на вечерний факультет Харьковского электротехнического института. Одновременно был главным редактором заводской многотиражки, замечательной тем, что вы-



**Доктор технических наук
Натан Явлинский (1912–1962).**

ходила она на пяти языках: русском, украинском, еврейском, латышском и немецком (на предприятии, эвакуированном в Первую мировую войну (1914–1918 гг.) из Риги, работало много латышей и немецких специалистов). На третьем курсе Натан Аронович стал начальником одного из конструкторских бюро завода, а в 1936 г. защитил диплом инженера и вскоре поступил в Харьковский физико-технический институт на физический факультет, пручившись там заочно всего два курса. Поводом для ухода, как он объяснял нам, молодым сотрудникам, стало рождение первенца, Юлия. Но теперь мы знаем, что не это обстоятельство, а исключение из рядов ВКП(б) — Всесоюзной коммунистической партии (большевиков) — и последовавшее увольнение с завода прервали обучение. Вероятно, причиной мог служить арест в 1927 г. по делу о троцкистах* старшего брата его будущей жены. В течение года с небольшим Натан Аронович был безработным, однако потом его восстановили и в партии, и на производстве в прежнем статусе — начальника конструкторского бюро.

В 1941 г., когда началась Великая Отечественная война, Явлинский пошел добровольцем на фронт, но попал туда сложно. На него, назначенного в тот момент директором одного из филиалов Харьковского

электромеханического завода, эвакуированного на Урал, написали бумагу с обвинением в саботаже. Однако молниеносное наступление немцев разрешило этот вопрос. На фронте молодой боец оказался вместе с сотней солдат в окружении. Был полный хаос, вспоминал позже Натан Аронович. Быстро сориентировавшись по сохранившейся у него карте, он пошел в сторону востока, обходя населенные пункты и выбирая лесистые массивы. А поскольку направление держал уверенно, вокруг него стали группироваться люди и вместе им удалось выйти из окружения.

В 1942 г. Явлинский участвовал в обороне Сталинграда, был начальником мастерских по ремонту артиллерийской техники, которую каждую ночь привозили в разбитом состоянии с правого берега Волги. Он считал своей главной заслугой в этой роли организацию круглосуточных сварочных работ, хотя по правилам они были запрещены ввиду светомаскировки. Но немцы использовали такие яркие осветительные ракеты, что никакая электросварка не могла нарушить конспирацию. Поэтому за круглосуточную работу ремонтных мастерских Натан Аронович одновременно с взысканиями получал благодарности.

В 1944 г., отозванный с фронта, он возглавил в московском Всесоюзном электротехническом институте Центральное конструкторское бюро, разрабатывавшее и внедрявшее в производство новые образцы вооружения и военной техники. Явлинский создавал там электромагнитные усилители для артиллерии. В 1945 г. его командировали в Германию для отбора и отправки в СССР электротехнического оборудования по репарации (восстановлению) убытков, понесенных гражданским населением страны вследствие войны. В 1949 г. был удостоен звания лауреата Сталинской премии «за разработку конструкции и освоение производства электротехнических машин».

В тот год директор крупнейшего предприятия отечественного электромашиностроения «Электросила» (Ленинград) и одновременно заместитель министра электропромышленности СССР Дмитрий Ефремов, лично знавший Натана Ароновича, командировал его в Лабораторию измерительных приборов АН СССР, где под руководством выдающегося физика Льва Арцимовича (академик с 1953 г.)* создавали промышленную технологию электромагнитного разделения изотопов урана, для наладки систем питания разделительных установок. А когда в отделе Арцимовича приступили к экспериментам по термоядерному синтезу (1951 г.), Явлинский резко сменил направление деятельности, сфокусировав внимание на плазме и УТС.

Первая работа коллектива по изучению газовых разрядов (1951 г.), опубликованная в сборнике «Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций», и ряд последовавших за ней показали всю сложность экспериментов в тороидальной геометрии. На-

*Троцкизм — одно из течений марксизма, господствовавшее в нашей стране в 1920–1930-е годы, идеологом которого был лидер левой оппозиции Лев Троцкий (прим. ред.).

*См.: Е. Великов. Термоядерное горение; В. Стрелков. Царского пути в термояде нет. — Наука в России, 2009, № 1 (прим. ред.).



**Натан Явлинский —
участник обороны Сталинграда.
Весна 1943 г.**



**Натан Явлинский (в центре)
в составе военной миссии СССР
в Германии по вопросам репарации.
1945 г.**

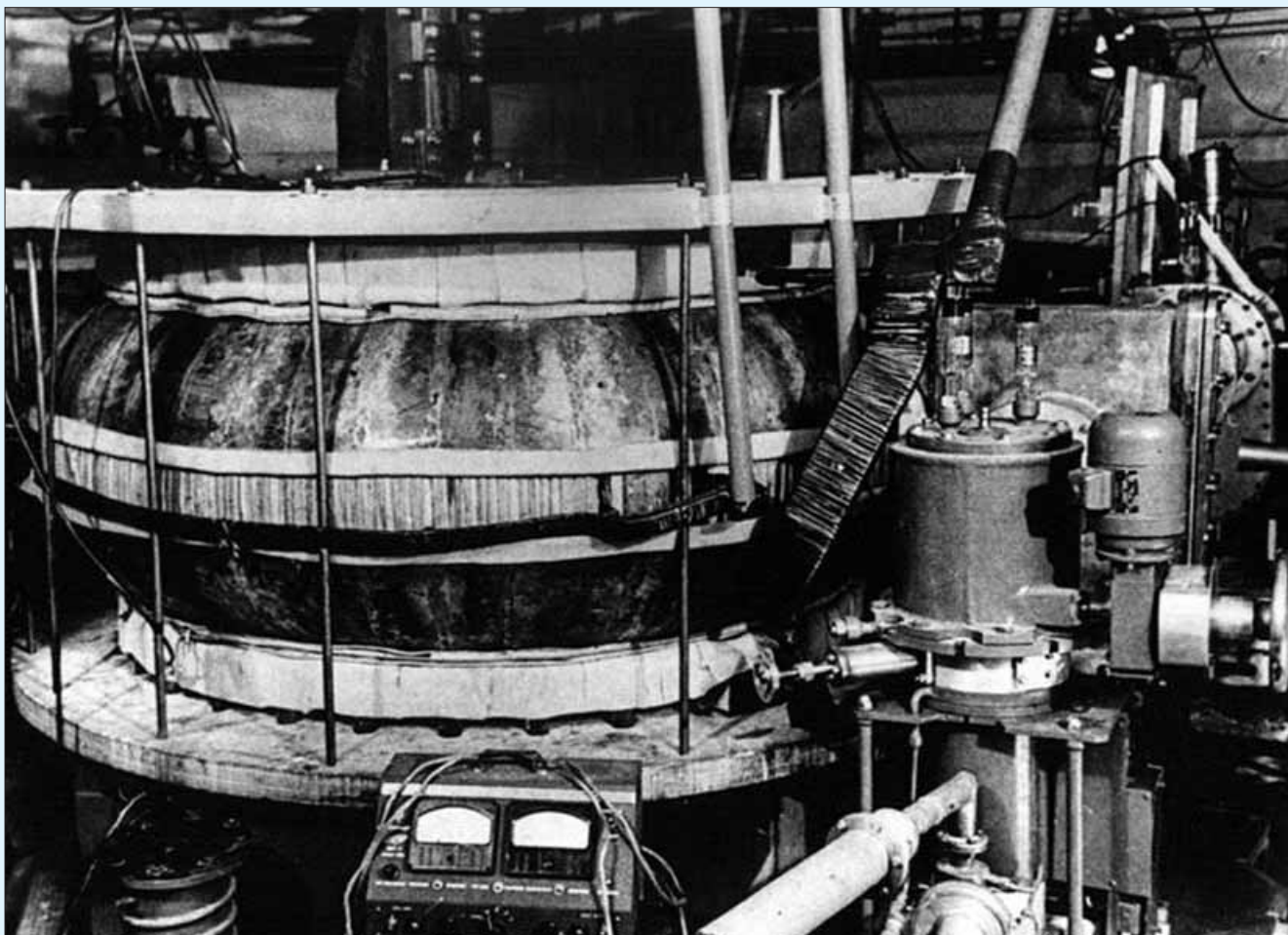
помним, основоположники УТС Тамм и Сахаров предлагали для нагрева и удержания плазмы магнитную систему в форме тора (бублика) с текущим по ней током, поэтому их можно назвать отцами-теоретиками токамака. Создателями же его как машины следует считать доктора физико-математических наук Игоря Головина (1913–1997) и Натана Явлинского. Оба, возглавляя в отделе Арцимовича два сектора, занимались тороидальными разрядами. Причем если первый был, скорее, идеологом эксперимента (ставил задачу, давал советы и рекомендации, что измерять), то второй искал пути ее решения и сам участвовал в практической реализации.

В середине 1950-х годов эксперименты в области УТС шли в разных направлениях. Что касается тороидальных систем, то здесь основные опыты проходили на установке ТМП (тор с магнитным полем), построенной в 1954 г. по техническому заданию Головина и Явлинского. На ней изучали условия зажигания разряда, его устойчивость, оценивали величину электронной температуры.

В конце 1957 г. британский научный журнал «Nature» опубликовал сенсационное сообщение о результатах экспериментов на установке «Зета». Англичане измерили нейтронный выход, по нему посчитали выполнение так называемого критерия $n\tau_E$, согласно которому возможность осуществления термоядерной реакции с положительным выходом зависит от значения произведения плотности нагреваемой плазмы n на время ее остывания τ_E , и получили ошеломляющие цифры. Правда, через два года выяснилось, что они ошибочны, но в тот момент информация об экспериментах на «Зете» вызвала бурные дискуссии в институте и способствовала расширению отечественных исследований горячей плазмы в тороидальных системах.

Академик Игорь Курчатов* принял решение срочно построить аналогичный инструментарий в Советском Союзе. И тогда в ленинградском Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры в

*См.: Е. Велихов. Его мечта — создать солнце на Земле. — Наука в России, 2003, № 1 (прим. ред.).



Установка Т-1, вошедшая в историю термоядерных исследований как первый токамак. 1958 г.

рекордные сроки (всего за 8 месяцев) создали установку «Альфа» — полномасштабную копию «Зеты».

Курчатов оказывал сильное давление на Арцимовича, требуя повторить английские эксперименты. Тот некоторое время держался. Но весной 1958 г. встал вопрос о закрытии ТМП и сооружении на ее месте системы, подобной британской. Она имела алюминиевую камеру, так как считалось, что окисный слой Al_2O_3 играет какую-то роль во взаимодействии плазма—стенка, и, может быть, удивительные результаты «Зеты» связаны именно с этим обстоятельством. Однако финал ее был плачевным: камеру изготавливали на авиационном заводе, где не смогли обеспечить вакуумную плотность швов — сваренный из секторов тор протекал, как решето. В итоге машина так и не заработала.

А Явлинский в это время уже строил установку Т-1, вошедшую в историю термоядерных исследований как первый токамак (1958 г.). На ней был подтвержден критерий Крускала-Шафранова (устойчивость токовой плазмы в магнитном поле), названный так по именам выдающихся физиков-теоретиков Мартина Крускала (США) и Виталия Шафранова (Россия). Специалисты впервые использовали в этих экспериментах диафрагму для ограничения сечения плаз-

менного шнура, применяемую теперь на многих установках. На Т-1 были сделаны измерения мощности радиационных потерь. Как оказалось, они являются основным каналом потерь энергии из плазмы в этой установке, причем более 80% из них приходится на область вакуумного ультрафиолета.

Следует отметить, в секторе Явлинского работала построенная по его идеям электронная вычислительная машина (ЭВМ). В отличие от других ЭВМ тех лет, она не требовала круглосуточной эксплуатации. На ней Натан Аронович вместе с Глебом Долговым-Савельевым пытались проводить первые количественные расчеты мощности потерь с линейчатым излучением спектральных линий примесей. Можно сказать, это было начало работ по компьютерному моделированию процессов в плазме токамака.

Когда выяснилось, что излучение примесей выносит значительную часть энергии из плазмы, Явлинский инициировал создание новой установки Т-2, содержащей прототипы большинства функциональных элементов последующих токамаков: здесь уже были высоковакуумная откачка, двойной вакуум и цельнометаллическая прогреваемая камера. Тем не менее эту систему далеко не все признавали единственным вари-



**Пионеры в исследовании
проблемы управляемого
термоядерного синтеза:
Лев Арцимович,
Натан Явлинский,
Глеб Долгов-Савельев. 1960 г.**

антом конструкции термоядерной установки. И после II Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии (1958 г.) встал вопрос: что соорудить в Курчатовском институте для дальнейших масштабных экспериментов по получению термоядерной реакции в плазме — стелларатор* или токамак? Натан Аронович вместе с физиками-теоретиками Станиславом Брагинским и Виталием Шафрановым (академик с 1997 г.) дали обоснованное заключение: на данном этапе развития токамаки более перспективны для использования в программе УТС (отчет «Сравнение систем стелларатор и токамак», декабрь 1958 г.). В результате Курчатов решил соорудить в институте крупнейшую по тем временам в Европе термоядерную установку Т-3.

Тогда в секторе Явлинского уже достоверно знали условия макроскопической устойчивости плазменного шнура в токамаке, доказали, что радиационные потери, связанные с линейчатым излучением ионов примесей, играют существенную роль в энергетическом балансе плазмы, а поперечная по отношению к направлению плазменного тока компонента рассеянных магнитных полей кардинально влияет на условия равновесия плазменного шнура.

Стандартное выражение «это сделано под руководством Натана Ароновича» не хочу употреблять (оно

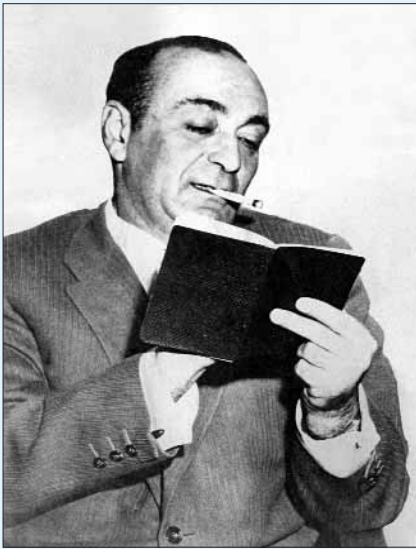
*Стелларатор — ловушка с замкнутыми магнитными поверхностями. Но, в отличие от токамака, образующее их полоидальное магнитное поле создается током во внешних витках. Идею такой установки выдвинул в 1951 г. американский физик Лайман Спитцер. Первый стелларатор появился в Принстонской лаборатории физики плазмы, США (прим. ред.).

звучит формально и часто фальшиво). Точнее сказать, будучи организатором этой работы, он оставался одним из нас, душой большого коллектива физиков, инженеров и техников. Когда в 1958 г. во всех лабораториях мира рассекретили работы по УТС и стало ясно, что не только «в области балета мы впереди планеты всей», группе ученых (Явлинскому в том числе) во главе с Арцимовичем присудили Ленинскую премию «за исследования мощных импульсных разрядов в газе для получения высокотемпературной плазмы».

Отметим, после ввода в строй установки Т-3 в 1962 г., уже после гибели учителя, эксперименты на ней продолжили его ученики. К середине десятилетия нам удалось совершить настоящий научный прорыв: измеренное на токамаке энергетическое время удержания плазмы составило ~20 мс, что более чем на порядок превышало общепринятый в то время прогноз — так называемое «бомовское» время, рассчитанное по эмпирической формуле, выведенной в конце 1940-х годов американским физиком Дэвидом Бомом. На этой же машине зарегистрировали термоядерное нейтронное излучение устойчивого плазменного витка. Иными словами, на Т-3, сооруженной по инициативе Натана Ароновича, впервые в мире получили управляемую термоядерную реакцию синтеза — УТС.

Инженер от бога, он сразу мог сказать: «Это устройство будет работать, а это — нет». Было бы преувеличением утверждать, что Явлинский — великий физик, но важно другое: он непрерывно учился физике.

Одна из его учениц доктор физико-математических наук Ксения Разумова, объясняя, почему Натана Аро-



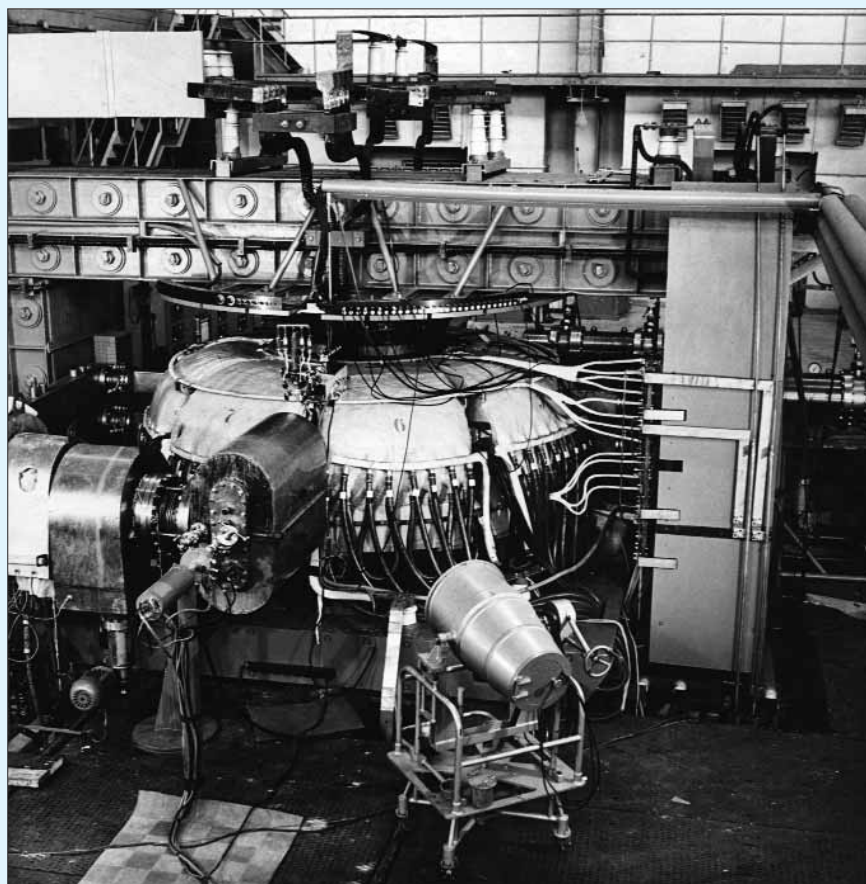
Поездка за рубеж первой советской делегации по термоядерным исследованиям, в составе которой был Натан Явлинский. Лос-Аламосская национальная лаборатория, США. 1960 г.

новича называли Мудрым, заметила: «Его мудрость заключалась именно в том, что, не пренебрегая, конечно, приобретением физических познаний, основные силы он направлял на создание коллектива. Складывал его кирпичик к кирпичику так, что получился монолит на зависть самой крепкой семье... Этот коллектив продержался долго после смерти Натана Ароновича, и позже, когда отдел разросся, стал необходимым центром кристаллизации».

О научном руководителе советской программы исследований в области управляемого термоядерного синтеза Арцимовиче ученый отзывался так: «Лев Андреевич — хороший физик, когда физика — это к нему, он нам поможет, объяснит. Но когда речь идет об организации какого-то дела, то лучше без него». Причем

Явлинский не декларировал это — он так поступал. Напрямую ходил к Курчатову, сам общался с Госкомитетом Совета Министров СССР по использованию атомной энергии. От чиновников не требовал того, что они «обязаны делать». Понимал, что «могут сделать», и именно это направлял на общую пользу. Арцимович к такому подходу относился, как я понимаю, спокойно и не ревниво.

Как настоящий руководитель, он старался «выдвигать» своих сотрудников. Один из моих коллег, Эдуард Кузнецов, сотрудник Госкомитета, рассказывал, как в 1959 г. обсуждали вопрос о поездке первой делегации по УТС во Францию. Тогда еще не было выездных комиссий — все решал Курчатов. В состав делегации включили доктора физико-математических наук Сте-



**На установке Т-3 (1962 г.),
созданной по инициативе
Натана Явлинского, впервые в мире
получили управляемую
термоядерную реакцию синтеза — УТС.**

пана Лукьянова. На оставшееся место претендовали двое: «наш» Владимир Муховатов и сотрудник другого отдела Сергей Фанченко, уже имевший опыт зарубежных поездок. Баланс складывался в пользу последнего. Кроме того, его выдвигенцы добавили: «Он же знает 12 европейских языков!». Явлинский тут же парировал: «Игорь Васильевич, пошлите его на лингвистический съезд». Раздался общий хохот, и в результате среди делегированных оказался беспартийный (что еще допустимо), но неженатый (а это уже было явно против тогдашних канонов) Муховатов.

К слову, сегодня он — известный специалист в области высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза, много сделавший для создания Международного экспериментального реактора ИТЭР*, строящегося в г. Кадараш (Франция). На 90-летие Явлинского он прислал из далекой Японии, где находился в командировке, короткое письмо, передающее характер отношений, складывавшихся в первые годы освоения УТС между начальником и его молодыми сотрудниками: «Мое восприятие Натана Ароновича как руководителя было таково, что он всегда рядом, и ты в фокусе его внимания. Он восхищается тобой и считает тебя умнее и благороднее, чем ты сам

о себе думаешь. Он видит и понимает явные и тайные мотивы твоих действий, и не осуждает тебя, а огорчается из-за частых несоответствий твоих действий с его представлениями о тебе. Это в какой-то мере объясняет, как могло случиться, что человечество выдумало Бога в человеческом образе».

А Ксения Разумова сформулировала основные натаповские принципы: «Рост твоих подчиненных гораздо полезнее твоего собственного; позаботься о своих сотрудниках и помоги им раньше, чем они об этом попросят, — тогда они будут спокойно работать, полностью отдавая себя делу; никогда не задерживай человека, если он хочет уйти из подразделения — меньше будут уходить; «будь хорошим директором на своем заводе» (его выражение), а не сваливай на то, что кто-то плохо работает сверху или сбоку; в первую очередь надо премировать рабочих и лаборантов, и в самую последнюю — руководство; ничего для себя».

Эти правила были для него незыблемы. Он жил по ним ежедневно, деловыми и человеческими качествами подавая нам, сотрудникам его сектора, пример неизменной доброжелательности к окружающим и достойного служения науке.

*См.: В. Глухих. На пороге термоядерной эры. — Наука в России, 2003, № 3; Л. Голубчиков. Токамак — интернациональный проект. — Наука в России, 2004, № 1 (прим. ред.).