

**К 90-ЛЕТИЮ АЛЕКСЕЯ ИВАНОВИЧА МОРОЗОВА (30.03.1928 — 6.05.2009)<sup>1</sup>**

30 марта 2018 г. исполнилось 90 лет со дня рождения Алексея Ивановича Морозова — выдающегося учёного в области физики плазмы, электрореактивных плазменных двигателей и управляемого термоядерного синтеза, доктора физико-математических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РФ, лауреата Государственной премии СССР и престижных международных премий, главного научного сотрудника Отдела теории плазмы НИЦ «Курчатовский институт», члена Российской академии естественных наук. Мировую известность принесли А.И. Морозову его пионерские работы по созданию и внедрению в космическую технику стационарных плазменных двигателей (СПД, в зарубежной литературе — stationary plasma thruster, SPT). Впервые испытанные на спутнике «Метеор» в 1972 г., двигатели СПД с тех пор нашли широкое применение в качестве коррекционных двигателей на отечественных и зарубежных спутниках. Это в значительной мере определяется тем, что уже к проведению первых лётных испытаний были привлечены, кроме Института атомной энергии (ИАЭ) имени И.В. Курчатова, такие промышленные организации, как Опытное конструкторское бюро (ОКБ) «Заря», нынешнее ОКБ «Факел», Всесоюзный институт электромеханики. Затем к исследованиям и совершенствованию СПД подключились Московский авиационный институт (МАИ), Центральный институт авиационного моторостроения (ЦИАМ) и другие. Координацию работ всех перечисленных организаций на этом важнейшем этапе становления технологии СПД в течение примерно 10 лет успешно осуществлял Алексей Иванович. Учитывая его огромный вклад в разработку концепции и разработку первых лабораторных моделей СПД, осуществлявшейся в ИАЭ под его руководством в лаборатории Германа Яковлевича Щепкина, руководство подготовкой и успешным проведением первых лётных испытаний СПД, специалисты, работающие в области ЭРД, называют Алексея Ивановича Морозова отцом СПД.

В этот же период он не прекращал научную работу, опубликовал несколько статей, в значительной мере повлиявших на развитие прикладных работ по СПД. К их числу можно отнести анализ условий устойчивости ускорения ионного потока в скрещенных электрическом и магнитном полях и определение необходимости возрастания магнитной индукции в зоне ускорения для обеспечения названной устойчивости, анализ возможности формирования фокусирующей геометрии эквипотенциалей электрического поля формированием соответствующей геометрии силовых линий магнитного поля, анализ влияния

<sup>1</sup>Обновлённый и дополненный вариант статьи в газете «Курчатовец», 1998, № 7—8.

стенки на поперечный перенос электронов с предложением нового механизма пристеночной проводимости в плазме разряда со скрещенными полями.

В 1990-е годы у СПД открылось долгожданное «второе дыхание»: они убедительно доказали способность надёжного долговременного функционирования, и потому открылась возможность экономичных космических экспедиций в пределах Солнечной системы. Любопытная и безусловно символическая деталь — в Парижском музее науки и техники модель СПД с указанием авторства А.И. Морозова оказалась единственным экспонатом российского происхождения. Создание СПД получило высокую оценку мирового аэрокосмического сообщества — А.И. Морозова наградили международной медалью к 100-летию электрореактивного движения «За выдающиеся достижения в области космических электрореактивных двигателей», в 2006 г. — Серебряной медалью Французской национальной академии атмосферы и космоса.

В целом разработки лётных образцов СПД и начало их применения в космосе в СССР примерно на 30 лет опередили аналогичные зарубежные разработки. Высокий уровень работ в области СПД сохранился в России и до настоящего времени. Так, в космосе отработали или работают свыше 560 СПД на более чем 117 космических аппаратах (КА), и большинство этих двигателей было произведено в России. Общее число СПД зарубежного производства, отработавших в космосе, пока не превысило 10. При этом число СПД, работавших в космосе в период 2011—2016 гг., составляло более 70% от числа всех электроракетных двигателей, работавших в космосе, а среди СПД рекордсменом является двигатель СПД-100 производства ОКБ «Факел». Следует добавить, что применение российских двигателей на зарубежных космических аппаратах сопоставимо с числом СПД, отработавших или работающих в составе отечественных КА. Так, в 2017 г. фирма Space Systems /Loral (США) выпустила медаль в честь сотого СПД-100, полетевшего работать в составе разработанного этой фирмой КА.

В настоящее время СПД используются не только в системах коррекции орбит КА, но и для доведения КА с промежуточной орбиты на рабочую, что позволяет значительно увеличить массу КА на конечной орбите и его возможности. СПД был использован также для доставки научного КА с околоземной на окололунную орбиту. Таким образом, применение СПД расширяется, т.е. начатое А.И. Морозовым дело живёт и развивается.

Впечатляет и то, что «движковый» компонент явился лишь одной из многих граней научного творчества А.И. Морозова. Уже с первых шагов в Курчатовском институте, куда он поступил в апреле 1957 г. после окончания аспирантуры физического факультета МГУ, А.И. Морозов выполнил (совместно с Л.С. Соловьёвым) ставшие классическими работы по теоретическому исследованию структуры магнитных полей и движения заряженных частиц в системах управляемого термоядерного синтеза. Здесь была впервые открыта волокнистая структура в замкнутых магнитных системах (известная ныне как магнитные острова) и указана неизбежность её воздействия на удержание плазмы. Другой находкой этого же цикла работ стала замысловатая форма целого класса траекторий заряженных частиц в тороидальном магнитном поле. Видимо, только удалённость авторов от фруктовой экзотики не позволила им в то время дать название для проекции траекторий на поперечное сечение тора «бананы», которое впоследствии прижилось в международном термоядерном сообществе. Работа на «корпускулярном» поле физики плазмы была продолжена А.И. Морозовым в 1970-е годы, и её результатом стала формулировка принципов новой корпускулярной оптики — «плазмооптика».

Но наиболее масштабной стала работа Алексея Ивановича, как теоретическая, так и организаторская, по проблеме ускорения плазмы. Именно здесь с наибольшей силой раскрылся его уникальный дар: нацеленность на конечный практический результат и способность проходить этот тернистый путь целиком — от формулировки физических принципов через их детальный теоретический анализ и математическое моделирование к воплощению в живое «железо». В течение почти четырёх десятилетий он играл ведущую роль в разработке теоретических основ плазмотоники и проектировании плазменных ускорителей как для космических аппаратов, так и для инжекции плазмы в магнитные ловушки. В течение многих лет он был бессменным председателем секции «Плазменные ускорители и ионные инжекторы» Совета по физике плазмы АН СССР. В 1960—1970-х годах он был организатором и вдохновителем межведомственного семинара и нескольких всесоюзных конференций по электрореактивным двигателям, бессменным организатором и руководителем восьми всесоюзных конференций по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. И наконец, более 10 лет А.И. Морозов являлся научным руководителем одного из лидеров инженерии электроракетных двигателей — ОКБ «Факел» (г. Калининград на Балтике), эмблемой которого и стал морозовский СПД.

Целый ряд теоретических аспектов проблемы ускорения плазмы не только стал классическим, но и дал жизнь новым разделам теории плазмы. Так, осознание роли и исследование эффекта Холла в плазме (совместно с А.П. Шубиным, 1960-е годы) стало отправной точкой для так называемой электронной МГД (ЭМГ), получившей интенсивное развитие в работах теоретиков по физике плазменных размыкателей тока.

Другим «теоретическим» столпом проблемы ускорения плазмы стало стимулирование численного моделирования. А.И. Морозов является одним из пионеров использования численных методов для моделирования структуры магнитных полей и плазменных течений. Его многолетнее сотрудничество с Институтом прикладной математики РАН (сначала с И.М. Гельфандом, на которого А.И. Морозова «замкнул» сам И.В. Курчатov, а позднее с группой К.В. Брушлинского, В.В. Савельевым) и другими академическими институтами привело к созданию представлений о поведении магнитных силовых линий в полях сложной конфигурации и к выявлению необычной структуры течений плазмы вдоль стержня с током в системах типа сопла Лавала. О плодотворности численного моделирования и его «обратном» влиянии на исходные теоретические представления свидетельствует то, что «естественное» расщепление магнитных поверхностей было обнаружено именно в численных расчётах.

Помимо СПД, важным практическим итогом «ускорительной» деятельности стали разработка и создание уникального квазистационарного плазменного ускорителя (КСПУ), обладающего рекордными параметрами производимых плазменных потоков. Программа эта была реализована в целом ряде институтов: в тогдашнем Троицком филиале ИАЭ (лаборатория Ю.В. Скворцова), Минске (Институт физики) и в наиболее завершённом виде в начале 1990-х годов — в Харькове (ХФТИ, лаборатория В.И. Терешина). Показательна история развития и претворения в жизнь основной идеи (1978 г.), открывающей возможность реализации ускорения плазмы в стационарном режиме, а именно организацию ионного токопереноса в радиальном направлении поперёк магнитного поля в упомянутом магнитном аналоге сопла Лавала. Это позволяет избежать негативного влияния эффекта Холла (замагниченность электронов не позволяет им переносить ток по радиусу). В истории КСПУ поучительно то, что ключевые теоретические построения оказались теснейшим образом зависимыми от на первый взгляд сугубо технологических аспектов проблемы. Неудивительно, что для решения проблемы КСПУ А.И. Морозову пришлось изобрести целый ряд технологических новшеств, из которых упомянем специальные газоразрядные анодные и катодные системы (трансформеры), входную и анодную ионизационные камеры, магнитную эмитирующую и магнитоионоприёмную поверхности. В последнее время КСПУ активно используется в ТРИНИТИ в экспериментах по облучению плазмой материалов первой стенки в токамаке ИТЭР для анализа их эрозийной стойкости в переходных плазменных процессах (ELM-событиях, срывах разрядного тока и др.).



Установка КСПУ-Т

Для осуществления этих работ создан уникальный экспериментальный комплекс плазменных ускорителей КСПУ-Т и КСПУ-Ве, не имеющий аналогов в мире. С применением этого комплекса Отделом магнитных систем проведён цикл исследований, сыгравших существенную роль при выборе обращённых к плазме материалов ИТЭР и приемлемых режимов работы токамака, оценке ресурса защитных покрытий и разработке методов по защите элементов оптических диагностик от запыления продуктами эрозии материалов. Реализована новая для КСПУ схема облучения материалов излучением плазмы, возникающим при торможении ускоренного плазменного потока на твердотельной мишени, что существенно расширило возможности использования комплекса как для задач ИТЭР, так и для технологических задач, направленных на улучшение эксплуатационных характеристик конструкционных материалов и создание покрытий с новыми полезными свойствами для практических приложений.

Другим примером неразрывности физики и технологии могут служить открытые в экспериментах с СПД в конце 1950-х годов явления пристеночной проводимости и аномальной эрозии поверхностей в скрещенных электрическом и магнитном полях. Работы по «доводке» СПД до наиболее экономичной модели (совместно с лабораторией А.И. Бугровой в МИРЭА) показали, что именно пристеночное

ускорение частиц и бомбардировка ими расширяющихся зазоров в конечном итоге определяют ресурс работы СПД.

Говоря о технологических аспектах, упомянем также и успехи СПД на «побочном» для него направлении — вакуумной ионно-плазменной технологии (травление, углубление имплантации ионов при бомбардировке ионными пучками и др.), получившей применение в ряде заводских производств.

Важным компонентом проблемы ускорения плазмы является выдвинутая А.И. Морозовым концепция магнитоплазменного компрессора, известная за рубежом как стационарный Z-пинч. Эта идея, получив экспериментальное подтверждение в ИАЭ им. И.В. Курчатова, нашла применение в разработках МВТУ сверхмощных газоразрядных источников света, а также в других задачах так называемой радиационной плазмодинамики. Переоткрытая позднее в Ливерморской национальной лаборатории США, идея магнитоплазменной компрессии пережила второе рождение в экспериментах в США (г. Сиэтл).

В последние три десятилетия усилия А.И. Морозова были направлены, в основном, на разработку принципов плазменных ловушек Галатей с  $\beta = 1$  ( $\beta$  — отношение плазменного давления к магнитному), организацию их создания и демонстрацию их эффективности в электроразрядном режиме. Задумав Галатею как ловушку для горячей плазмы, создаваемой в КСПУ, А.И. Морозов прогнозировал самостоятельное достижение в них термоядерных параметров. Эта концепция активно разрабатывалась им совместно с лабораторией А.И. Бугровой в МИРЭА, где проводились исследования на установках «Авоська» и «Октуполь». Близкие проблемы исследовались и на установке Галатей-пояс в Институте общей физики РАН (лаборатория А.Г. Франк). Хотя ожидания пока не оправдались, интерес к этой идее сохраняется в плазменном сообществе.

Говоря об идее СПД, трудно пройти мимо её биографического контекста. Дело в том, что эта идея восходит ещё к «докурчатовским» годам А.И. Морозова, когда он работал преподавателем физики в техникуме в небольшом городке Людиново в Калужской области. Ему пришлось уехать туда после окончания физфака МГУ, несмотря на его принадлежность к числу лучших студентов на курсе (дипломная работа А.И. Морозова была одной из первых работ по квантовой теории синхротронного излучения). В Людиново ввиду его «сверхстоклометрового» статуса скопилось немало отборной интеллигенции, что определённо сыграло положительную роль для молодого физика. В Людиново А.И. Морозов познакомился со своей будущей женой Ниной Владимировной, тоже физиком. Их общение оказалось взаимно полезным также и в профессиональном отношении. Уровень преподавания А.И. Морозова был таким, что несмотря на временные недоразумения с более косной частью учащихся, из числа его учеников вышли впоследствии высококвалифицированные инженеры и учёные, включая будущего академика-машиноведа. И вот, наконец, в переломном 1953 г. для А.И. Морозова открылась возможность поступления в аспирантуру МГУ (сначала — заочную, а через два года — уже и очную). Здесь он под руководством профессора А.А. Соколова выполнил работу по теории черенковского излучения движущихся токов (эта работа была упомянута И.Е. Таммом в его «нобелевской» лекции), а после успешного окончания аспирантуры был принят в «термоядерный» отдел ИАЭ им. И.В. Курчатова в теоретический сектор М.А. Леонтовича.

Возвращаясь от исторического экскурса к иллюстрации широты научных интересов А.И. Морозова, упомянем его выход за рамки не только ускорительной тематики, но и самой физики плазмы. Так, он выполнил ряд работ (совместно с А.М. Фридманом) по динамике упругих гравитирующих нитей в космосе. (Заметим, что для А.М. Фридмана эти работы стали одним из этапов на пути к предсказанию им местоположения ряда спутников Урана непосредственно перед их обнаружением космическим зондом «Вояджер».)

А.И. Морозов всегда определённо предпочитал в физике работу на «непаханом поле», и притом не откладывая глубокую «вспашку» на будущее. Поэтому не столь уж удивительно, что стремление испытать свой природный дар «физика-натуралиста» на значительном удалении от физики привело его в последнее десятилетие к решительному «вторжению» именно в почвоведение, которое он сам считал «наукой будущего». Здесь А.И. Морозов сконцентрировался на поиске того, что обеспечивает структурное единство почвы: она предстала как результат гигантского труда и борьбы грибов («полис грибов»). По сути впервые в почвоведении появилась концепция не только с прозрачной физической моделью, но и с нетривиальным для этой области математическим аппаратом физической кинетики. Важным представляется и сам статус разработанного подхода в системе общих принципов почвоведения: концепция

«полиса грибов» является реализацией и развитием принципа приоритетности биологического компонента почвы над остальными. Это пришествие «варяжского гостя» вызвало непрерывно возрастающий интерес и признание в среде почвоведов. Естественно, что переоценка по сути господствовавшего в этой науке «минералогического» взгляда на почву вызывает неоднозначную реакцию у части специалистов. Однако их контраргументация по сути сводится к защите экстенсивного описательного подхода, что только усиливает ощущение значимости внесённых А.И. Морозовым перемен. Результаты своих трудов в этой области он опубликовал в монографии «О почве и почвоведении (взгляд со стороны)» в 2007 г.

Ещё одним ярким свидетельством необычайной широты интересов А.И. Морозова может служить его обращение к истории древнего Египта. Взгляд физика на динамику пыли, рождённой вулканическими извержениями, привёл к установлению рациональной картины для причинной связи двух совершенно разнородных явлений — «египетской тьмы», вызванной потоками пепла из вулкана Санторин, и череды доголе казавшихся парадоксальными политико-идеологических переустройств, к которым прямо или косвенно оказались причастны такие мифические и реальные герои древности, как бог Солнца Атон, его земной наместник Эхнатон и ставшая символом «древнеегипетского Ренессанса» его жена Нефертити (см. статью А.И. Морозова в журнале «Наука и религия», 1990, № 3).

Обращение А.И. Морозова к истории не случайно — в его личности ясно проступает и «художественная» сторона. Вспомним о его мечте (по-видимому, генетически обусловленной, ведь его отец был художником) собрать на стенах отдельной комнаты (увы, гипотетической) репродукции (увы, другого нет) картин и скульптур последних трёх тысячелетий и предоставить приходящим друзьям возможность датировать их. А.И. Морозов был уверен, что едва ли кто-либо справится с этой задачей полностью, ибо красота и её ощущение — это «инварианты» многовековой людской цивилизации.

А.И. Морозов был, как и многие очень талантливые и неординарные люди, в чём-то соткан из противоречий, являющихся, как говорится, естественным продолжением достоинств. Его огромная энергия и неукротимая воля (отсюда — КСПУ и магнитоплазменный компрессор с их мощнейшими потоками энергии) мирно уживаются с нескрываемой симпатией к спокойным и устойчивым плазменным течениям (отсюда стационарный плазменный двигатель, квазистационарные плазменные ускорители) и к системам, не подверженным, как он полагал, турбулентным переносам (отсюда его идеи об идеальных плазменных ловушках Галатях).

Отчасти в силу масштабности самого А.И. Морозова, отчасти вследствие сложившихся обстоятельств — трудной судьбы «ускорительной» тематики на площадке Курчатовского института ему было уготовано проявить уникальную способность давать импульс развитию и «материализации» своих идей на значительном удалении — в других институтах, других городах, других странах (вспомним МАИ, МВТУ, Ленинград, Минск, Харьков, Троицк и, конечно, МИРЭА и ИОФ РАН, не говоря уж о Франции и США).

Впрочем, многогранная деятельность А.И. Морозова не оставалась без поддержки и в родном институте. Известна благотворная роль Л.А. Арцимовича в развёртывании исследований по плазменным ускорителям, а впоследствии, в 1970—1980-е годы, и А.П. Александрова в содействии продвижению работ по СПД и КСПУ. А.И. Морозов четырежды отмечался институтской премией им. И.В. Курчатова, удостоен звания «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР», в 1971 г. был награждён орденом Трудового Красного Знамени, в 1991 г. ему присуждена Государственная премия СССР, а в 1992 г. он избран академиком Российской академии естественных наук. И наконец, две уже упомянутые престижные международные аэрокосмические премии. А.И. Морозов был избран в Французскую национальную академию атмосферы и космоса.

Впечатляют глубина и масштаб научных исследований А.И. Морозова в физике плазмы: четыре монографии, последняя из которых — второе издание «Введения в плазмодинамику» появилась в 2008 г., семь крупных обзоров, более 300 научных статей и докладов, 38 изобретений и 4 международных патента. Под его руководством и по его идеям защищено более 25 кандидатских диссертаций. Впечатляет также и его «появление» вдали от проторенных дорог как внутри самой физики, так и далеко за её пределами.

Вызывает восхищение то, что А.И. Морозов всегда был полон новых идей и конкретных планов, непреклонно стремился к заветным целям, вдохновлявшим его и многочисленных его учеников и последователей, не почивал на заслуженных лаврах, до последних дней жизни продолжал научную работу, оставаясь истинным Учёным.

*Друзья и коллеги по Отделу теории плазмы НИЦ «Курчатовский институт»  
и из других институтов и организаций*