

Представления К.Э. Циолковского и Ю.В. Кондратюка о конструкции ракетного двигателя



Лариса Васильева,
ведущий инженер-программист НПО Энергомаш
Вячеслав Рахманин,
главный специалист НПО Энергомаш, к.т.н.,
член-корреспондент РАК им. К.Э. Циолковского

К.Э. Циолковский – основоположник теории космонавтики – в многочисленных научных трудах рассматривал как теоретические, так и практические вопросы создания техники для космических полетов. И хотя общий уровень науки и техники первой трети XX века не позволял создать ракету для таких полетов, К.Э. Циолковский в своих работах изложил технические основы будущей ракетной техники.

Ю.В. Кондратюк – создатель собственной теории космических полетов – долгие годы был мало известен в научно-технической среде. Так сложилось, что его теоретические разработки по космонавтике составляют, к сожалению, только два печатных труда. Но это не снижает его вклада в теорию космонавтики. Для иллюстрации значимости разработанной им теории можно достаточно напомнить читателю, что предложенную им схему полета и посадки пилотируемого аппарата на Луну использовали американские ученые при разработке своей лунной программы.

Авторы статьи стремились не только передать основные мысли теоретиков космонавтики о ракетном двигателе, но и максимально сохранить их своеобразный язык. Это, по нашему мнению, должно не только сделать статью более достоверной, но и в какой-то мере передать дух времени, романтизм зарождения одного из великих научно-технических достижений ушедшего XX века – ракетно-космической техники.

В трудах К.Э. Циолковского рассмотрен широкий спектр различных технических вопросов, связанных с созданием реактивных самолетов, металлических дирижаблей, с осуществлением межпланетных перелетов. Но в центре его внимания было решение проблем по созданию ракет с двигателями, работающими на жидком топливе. В своем основополагающем труде "Исследования мировых пространств реактивными приборами" он дает такое определение: "Для путешествия вне атмосферы и всякой другой материальной среды на высоте 300 км, а также еще дальше, между планетами и Солнцем, нужен специальный прибор, который мы только для краткости будем называть ракетой". И далее там же: "Ракетой я называю реактивный прибор, который двигается отталкиванием вещества, запасенного в нем заранее".

В своих работах Циолковский указал наиболее рациональные пути и перспективы развития этого нового вида техники, а также дал ряд схем ракетных устройств, имеющих практическое значение. Одним из таких устройств является жидкостный ракетный двигатель.

Оценивая с сегодняшних позиций представления Циолковского о ракетном двигателе, невольно испытываешь бесконечное уважение к человеку, который, не имея инженерного образования, опираясь лишь на собственное воображение, сумел определить основные принципы, которые следовало положить в основу конструкции ЖРД, описал ее составные части и сформулировал технические требования к двигателю, которого никто еще не разрабатывал. Конечно, в представлениях Циолковского по нынешним меркам было много упрощенного, до некоторой степени наивного. Циолковский и сам это отчетливо понимал. Так, оглядываясь на четверть века своих занятий идеей реактивного движения, он написал статью "Труды о космической ракете 1903-1927 годы", в которой признал: "Ценность моих работ состоит главным образом в вычислениях и вытекающих отсюда выводах. В техническом отношении мною почти ничего не сделано. Тут необходим длинный ряд опытов, сооружений и выучки. Длинный путь экспериментального труда неизбежен. Пока могут быть даны малозначущие схемы и приводимые тут указания..."

И в то же время Циолковский удивительно близко подошел к типовому облику современного жидкостного ракетного двигателя. Чтобы прийти к такому результату он в течение более 25 лет размышлял над химико-физическими процессами, протекающими в камере сгорания ЖРД, и результаты этих размышлений находили место в регулярно публикуемых им научных трудах. В этих работах при описании ЖРД наибольшее внимание уделено конструкции и условиям работы камеры сгорания или "взрывной трубы", как ее называл Циолковский на протяжении всей своей творческой жизни. И это закономерно, т.к. по его определению "главный двигатель ракеты есть взрывная труба".

Уже в первом своем научном труде по ракетной технике "Исследования мировых пространств реактивными приборами", опубликованном в 1903 г., Циолковский, наряду с описанием и схемой ракеты, впервые изложил свое представление о ракетном двигателе. В этом описании двигатель и ракета пока единое целое: "В качестве исследователя атмосферы предлагаю реактивный прибор, т.е. род ракеты, но ракеты грандиозной и особенным образом устроенной, эта моя работа далеко не рассматривает всех сторон дела и совсем не решает его практической стороны относительно осуществимости, но в далеком будущем уже виднеются сквозь туман перспективы, до такой степени обольстительные и важные, что о них едва ли теперь кто мечтает.

Представим себе такой снаряд: металлическая продолговатая камера... Камера имеет большой запас веществ, которые при своем смешении тотчас же образуют взрывчатую массу. Вещества эти, правильно и довольно равномерно взрываясь в определенном для того месте, текут в виде горячих газов по расширяющимся к концу трубам вроде рупора или духового музыкального инструмента. В одном, узком конце трубы совершается смешение взрывчатых веществ: тут получают сгущенные и пламенные газы. В другом, расширенном, ее конце они, сильно разредившись и охладившись от этого, вырываются наружу через раструбы с громадной относительной скоростью". Далее в работе приводится дополнительное указание: "Труба окружена кожухом с быстро циркулирующей в нем металлической жидкостью".

Эта, казалось бы, сделанная вскользь ремарка получает в одной из последующих глав обоснование: "Циркуляция металлической жидкости в кожухе, окружающем трубы, необходима для поддержания одной и той же невысокой температуры трубы, т.е. для сохранения ее крепости. Несмотря на это, возможно, что часть ее будет расплавлена, окислена и унесена вместе с газами и парами. Может быть, для избежания этого внутреннюю часть трубы будут выкладывать каким-нибудь особенным огнеупорным материалом: углеродом, вольфрамом или чем-нибудь иным". И далее, предположив, что в качестве "взрывчатых веществ" могут быть использованы жидкие кислород и водород, Циолковский предложил: "Так как температура их весьма низкая, поэтому ими полезно окружить или кожухи с циркулирующим металлом, или непосредственно самые трубы". Так была сделана первая рекомендация по охлаждению камеры ЖРД: покрытие внутренней стенки тугоплавким материалом и наружное охлаждение компонентом топлива.

В одной из последующих работ ("Дополнение 1914 г.") Циолковский впервые отошел от общих рассуждений по поводу обеспечения работоспособности ракетного двигателя и привел некоторые расчеты, которые конкретизировали его представление о ЖРД. В 1914 г. это выглядело так: "Представим себе начало взрывной трубы, куда в определенном отношении притекают газы в жидком виде (хотя бы водород и кислород). [...] Принимая плотность смеси газов за единицу, найдем, что упругость их, принимая в расчет высокую их температуру, не превысит 5000 атмосфер, или около 5000 кг давления на 1 см² поверхности трубы в самом ее начале. [...] Положим для простоты, что она цилиндрической формы и определим ее наибольшую толщину и площадь дна. [...] Давление на ракету весом в 10 т положим в 5 раз больше ее веса. [...] Итак, давление газов на дно трубы составит 50 000 кг. А так как газы в начале трубы дают 5000 кг давления на 1 см², то площадь основания трубы соста-

вит 10 см². Толщину стенок трубы, принимая лучшую сталь и обычную безопасность, вычислим равной 4,5 см при внутреннем диаметре 3,6 см. Значит, внешний диаметр будет менее 13 см, а внутренний менее 4 см".

Из приведенного фрагмента видно, как далеки были представления Циолковского в 1914 г. от реальных параметров ныне существующих ракетных двигателей. Основное его заблуждение - выбор давления в камере в 5000 атмосфер - порожден, видимо, его представлениями о протекающих термохимических реакциях. Смешение раздельно подающихся в камеру кислорода и водорода (это Циолковский специально оговаривал) приводило к образованию "гемучего газа" (этот термин Циолковский использует в своих трудах) и соответственно к взрыву (отсюда и "взрывная труба"). А взрыв в полужамкнутом объеме может создать давление и в 5000 атм.

Взрыв, а не горение топлива в камере - это, пожалуй, единственное ошибочное представление Циолковского о процессах, протекающих в ЖРД. В остальном его представления отличаются четкостью, а изложение - ясностью и образностью.

Здесь уместно отметить, что из всех приведенных материалов по ракетному двигателю цифровые расчеты являются наименее сильной стороной Циолковского. Выбор исходных данных, полученные на их основе параметры работы камеры и ее геометрические размеры свидетельствуют о том, насколько далеки были безусловно правильные теоретические представления ученого о ракетном двигателе от их практического воплощения в будущем.

Что же касается представления о взрывном характере протекания рабочего процесса в камере, то в 1933 г. в статье "Топливо для ракеты" Циолковский подверг анализу употребляемый им термин "взрыв". Он писал: "В сущности, нет резкой границы между процессом взрывания вещества и простым горением. Действительно, то и другое есть более или менее быстрое химическое соединение. Горение есть медленное соединение, взрыв же есть быстрое горение".

Надо сказать, что Циолковский отчетливо представлял термодинамическую картину создания реактивной тяги. В редакции 1926 г. своего основополагающего труда он замечал: "Для реактивного аппарата надо, чтобы возможно большая часть тепловыделительной или химической энергии частиц превратилась бы в согласованное поступательное движение. Тогда исчезнет теплота, а взамен её мы получим механическое движение или быстро движущуюся струю. Для этого употребляют длинную трубу. [...] Газ, расширяясь в трубе, все более и более охлаждается, теплота исчезает, заменяясь газовой струей. [...] Труба должна быть настолько длинна, чтобы газ на выходе расширился по крайней мере в 36 раз. Еще лучше - в 1300 раз".

Определив важность степени расширения газов в сопле камеры ЖРД, Циолковский в той же работе дал практические рекомендации по габаритам и конфигурации сопла. Он писал: "Цилиндрическая форма трубы оказывается чересчур длинной. Коническая форма тем сильнее сокращает эту длину, чем конус больше расширяется. Но чем угол его больше, тем более и потери энергии, т.к. движение газов уклоняется в стороны. Все же при угле в 10° потеря почти незаметна. Конус нужен усеченный. В меньшее основание накачиваются жидкие взрывчатые вещества. В трубе они смешиваются, взрываются, стремятся по трубе к открытому широкому основанию конуса, откуда и вырываются наружу сильно разреженные, охлажденные, со скоростью до 5 км/сек (для справки отметим, что скорость газа на срезе сопла современных камер составляет 2...3 км/сек - прим. авт.). В цилиндрической трубе полезное давление действует только на круглое основание цилиндра, в конической же трубе полезное давление происходит по всей внутренней поверхности конуса".

Но не только конструкция камеры ЖРД была в поле зрения Циолковского. Рассматривая ракету в комплексе, он в своих научных размышлениях коснулся также методов хранения и подачи компонентов топлива в камеру. Все в той же основной работе 1926 г. он писал: "Как же взрывать их и как хранить? Если взрывать так, как во всех известных старых и новых ракетах, то реактивное давление

при взрыве будет передаваться на всю поверхность сосуда (хранилища), что заставит делать его очень массивным. [...] Гораздо расчётливее держать элементы взрыва особо, без давления, и только накачивать их во взрывную трубу. Тогда для хранения их могут служить обыкновенные баки или даже сама разгороженная ракета" (заметим, что упомянутая вскользь "разгороженная ракета" - не что иное, как современные несущие баки).

Рассматривая насосную схему подачи топлива в камеру, Циолковский высказал интересную идею, которая, как и многие другие у него, прошла без акцентирования. Касаясь применения дополнительного двигателя для привода в действие топливных насосов, Циолковский писал: "Выход продуктов горения в нем должен быть направлен в общую взрывную трубу. Нельзя пренебрегать и малым использованием энергии горячих продуктов горения. [...] Извлеки механическую работу для привода насосов, мы воспользуемся продуктами горения как реактивным материалом во взрывной трубе". В другой главе все той же работы 1926 г., указывая на источник энергии для двигателя привода насосов, Циолковский писал: "...возможно для этого и предварительное использование небольшой части запаса взрывчатых веществ; после работы в моторе они поступают во взрывную трубу и совершают работу реакции". Вот так, вскользь, малозаметно. А ведь это - идея ЖРД дожиганием генераторного газа!

До сих пор мы имели дело со взглядами ученого на конструкцию ракетного двигателя, фрагментарно представленными в различных трудах, которые публиковались в период с 1903 по 1926 г. В 1927 г. вышла работа "Космическая ракета. Опытная подготовка", в которой Циолковский развил комплексное представление о ЖРД, сложившееся у него за 25 лет теоретической работы в области ракетостроения и космонавтики. Работа открывалась схематическим изображением "предполагаемого на первое время устройства аппарата". Далее приводилось пояснение работы основных агрегатов двигателя.

На схеме были представлены баки для компонентов топлива, топливные трубопроводы, насосы для подачи топлива с двигателем для их привода, пусковые и отсечные клапаны, смесительная головка, камера и рама двигателя. Как видим, Циолковский упомянул почти все элементы сегодняшней принципиальной схемы ЖРД. Нет только дросселя и регулятора, управляющих работой двигателя. Но в описании функционирования агрегатов Циолковский предусмотрел и этот момент, передав функциональную роль регулятора топливным насосам.

Рассмотрим, как в 1927 г. Циолковский представлял себе конструкцию и принцип работы всех составляющих элементов двигательной установки.

Бак горючего - водородный или нефтяной - окружал горячую "взрывную трубу", охлаждая её.

Бак окислителя - кислородный - окружал бак горючего для его охлаждения.

Топливные трубопроводы от баков к насосам "могут быть устроены из тонкого материала, т.к. не подвергаются давлению взрыва".

Топливные насосы предлагалось приводить в действие специальным мотором, продукты горения из которого выбрасывались в сторону, противоположную движению ракеты, для увеличения реактивного действия. Производительность насосов определяла объемный расход компонентов топлива. Дозирующая регулировка обеспечивалась изменением величины хода одного из поршней. Отсюда следует, что Циолковский предполагал использование насосов поршневого типа (через 5 лет насос такого типа пытались создать в ГД и ГИРДе независимо друг от друга, однако он оказался малопригодным для работы в составе ЖРД).

Клапаны предполагалось устанавливать на входе и выходе из каждого насоса. Судя по дальнейшему описанию их работы, это обратные клапаны. В пояснении Циолковского они должны были работать так: "Клапаны, ведущие во взрывную трубу, захлопываются с ужасной силой в момент взрыва. Только тогда, когда уменьшится давление в трубе, клапаны могут открыться, и поршни будут двигаться, чтобы дать трубе новую порцию взрывчатых веществ".

Смесительная головка по Циолковскому - это решетка с косыми дырами для лучшего смешения углеводородов с кислородом. Смешение и взрыв должно было происходить за решетками, где множество разнородных струй приходило в столкновение и смешение.

Камера - по Циолковскому - "взрывная труба конической формы". Ее расширяющаяся к выходу форма позволяла сократить длину всего устройства. Опыт должен был помочь определить наиболее выгодную степень ее расхождения или угол конуса.

Взрывную трубу следовало изготавливать из материала прочного (даже при высокой температуре), тугоплавкого и несгораемого; хорошо, если он также являлся бы лучшим проводником тепла. Циолковский считал целесообразным сделать трубу из двух оболочек: первой - внутренней, очень прочной и тугоплавкой, второй - менее тугоплавкой, но тоже прочной и хорошо проводящей тепло. "Благодаря этому тепло от страшного нагревания трубы вблизи решеток будет быстро уноситься наружной трубой. [...] Кроме того, труба охлаждается еще и жидкостями".

Подводя итоги изложению взглядов Циолковского на конструкцию ЖРД, следует отметить, что его предложения были в той или иной более совершенной форме использованы при разработке фундаментальной конструкции ЖРД.

Так, Циолковский обосновал целесообразность насосной подачи топлива, необходимость и возможность охлаждения внутренней стенки камеры компонентом топлива, дал рекомендации по использованию материалов и теплостойких покрытий для камеры, указал на выгоды применения конического сопла по сравнению с цилиндрическим, предложил основы организации смешения в камере.

Следует особо отметить, что Циолковский, может быть недостаточно акцентированно, но в явной форме указал на энергетическую эффективность схемы с дожиганием. Это же можно сказать и об идее несущих баков.

Есть в его работах и не вошедшая в статью идея схемы с безрасходным третьим компонентом, являющимся рабочим телом турбины. Сейчас в практической деятельности двигательных ОКБ проявляется интерес к возможному использованию такой схемы ЖРД.

Другой наш отечественный теоретик космических полетов и ракетной техники Ю.В. Кондратюк разработал собственную теорию завоевания Солнечной системы. Его основной научный труд "Завоевание межпланетных пространств" впервые был издан в 1929 г. в Новосибирске тиражом 2000 экземпляров. В авторском предисловии, датированном июнем 1925 г., Кондратюк указывал, что его работа была начата в 1916 г., потом в нее трижды вносились дополнения, а сама она подвергалась коренной переработке. Далее Кондратюк отмечал, что в процессе работы над книгой он не имел возможности ознакомиться с иностранной литературой по теме работы, а из трудов Циолковского смог увидеть только вышедшие в свет до 1911 г.

Отмечая теоретический характер своей работы, Кондратюк в этом же предисловии писал: "В работе отсутствуют конструктивные рисунки и чертежи: общие принципы конструкций легко могут быть выражены и словесно, частности же нами пока разрабатываемы быть не могут..." Более того, в первоначальной рукописи отсутствовала глава о приводящей силе космической ракеты - ракетном двигателе. По признанию Кондратюка в письме к профессору Н.А. Рынину, редактор первого издания профессор В.П. Ветчинкин обратил внимание автора "на огромное значение конструктивной разработки "горелки" - извергающей трубы, почему была написана и вставлена глава IV".

Впрочем, глава IV, названная "Процесс сгорания, конструкция камеры сжигания и извергающей трубы", занимает неполные две страницы книги. Чувствуется, что Кондратюк подошел к ее написанию довольно поверхностно. И тем не менее, учитывая полную самобытность автора, его представления о процессах в камере сгорания двигателя и ее конструкции представляют интерес для сегодняшних историков ракетной техники.

Итак, вот выдержки из IV главы: "Весьма существенным является вопрос о температурах в камере сжигания и в извергающей

трубе. Происходящая при высоких температурах диссоциация молекул не даст пойти химической реакции сразу полностью; при некоторой температуре (выше 3000 °С) для всех реакций наступит химическое равновесие, после чего дальнейшее их течение возможно будет лишь по мере потери тепла газами при их расширении в извергающей трубе.

Конструировать камеру сжигания и извергающую трубу придется следующим образом: те поверхности, которые будут подвержены действию температур более высоких, чем может выдержать самый огнеупорный материал, нужно делать металлическими (медными или из тугоплавких металлов, как хром или ванадий) и подвергнуть интенсивному охлаждению снаружи жидкими газами, подающимися в камеру сжигания. Остальные поверхности можно облицевать изнутри достаточно огнеупорными материалами".

На этом, собственно, и заканчивается описание Кондратюком предполагаемой конструкции камеры ЖРД. Все здесь правильно: и взгляды на термодинамику в камере, и на необходимость охлаждения... Но конструкция камеры как агрегата ЖРД отсутствует. Так что можно считать, что замечание В.П. Ветчинкина было "устранено" довольно формально.

Однако этим не исчерпываются взгляды Кондратюка на конструкцию ЖРД. В другой работе, написанной в 1918-1919 гг. и озаглавленной "Тем, кто будет читать, чтобы строить", Кондратюк дал еще несколько рекомендаций по созданию ракетного двигателя. Так, он предложил изготавливать сопло в виде параболоида вращения, только параболы более высокой степени, чем квадратная.

При этом внутреннюю поверхность сопла следовало, по его мнению, полировать для уменьшения потерь скорости газового потока на трение.

Рассматривая вопрос о сжигании топлива, Кондратюк анализировал различные схемы смесеобразования из кислородно-во-

дородных компонентов и пришел к выводу, что оптимальной может быть раздельная подача каждого компонента с чередованием подающих элементов - то, что сегодня называется "шахматная схема расположения форсунок".

Сделав вывод о целесообразности создания высокого давления в камере для повышения степени расширения газов, что, в свою очередь, должно повысить к.п.д. двигателя, Кондратюк считал необходимым применение насосной подачи топлива. Он писал: "Насосы приводятся в действие двигателем внутреннего сгорания или лучше турбиной, но опять нужен соответствующий материал, так как двигатель работает на гремучем газе". И здесь следует многозначительная сноска: "Выпускная труба этого двигателя должна открываться в камеру в таком месте, чтобы давление газов в камере позволяло выходить газам от двигателя".

Таким образом, и у Кондратюка просматривается идея ЖРД с дожиганием. На этом его рекомендации по созданию ракетного двигателя исчерпываются. К сожалению, указанная работа Кондратюка была впервые опубликована в 1964 г. в сборнике "Пионеры ракетной техники", так что говорить о ее влиянии на развитие конструкции ракетных двигателей не приходится.

Остается провести сравнение взглядов Циолковского и Кондратюка на конструкцию ЖРД. Практически их взгляды совпадают, только у Циолковского разработки имеют более глубокие обоснования, они шире по охвату узлов и агрегатов двигателя.

Знаменательно, что взгляды на конструкцию ЖРД у наших великих теоретиков во многом превосходили многое из того, что было создано "в металле" через десятки лет. Идеи основоположников космонавтики в дальнейшем нашли экспериментальное подтверждение в работах отечественных конструкторов, сделавших не менее важный шаг от теории к практическому ракетостроению.