

## Чем заправляют ракеты?

Очень часто, изучая тему “Реактивное движение”, ученики задают вопрос: “А чем заправляют ракеты?” Вопрос чисто химический, но не будешь же все время отправлять их за разъяснениями к учителю химии.

Итак, чем заправляют ракеты?

Топливо для ракет существует в двух агрегатных состояниях – жидком и твердом. Поэтому существуют жидкостные реактивные двигатели (ЖРД) и твердотопливные реактивные двигатели (ТТРД).

Над вопросом о топливе для ракет всерьез задумались в 20–30-е гг. прошлого века. Наибольшего успеха достигли ученые СССР и Германии. Но перед самой войной наши специалисты в силу разных причин стали отставать.

Ракетчикам Германии под руководством Вернера фон Брауна пришлось решать вопрос, что лучше подойдет в качестве горючего для ракет ФАУ-1 и ФАУ-2 (“ФАУ” – от первой буквы немецкого слова Vergeltungswaffe – оружие возмездия). Но сначала попытаемся понять, что такое ЖРД. ЖРД – отработанные, доведенные до совершенства тепловые машины, а их характеристики на 90 % зависят от применяемого топлива.

Понятно, что от качества топлива будет во многом зависеть полезная нагрузка ракеты, дальность полета и все прочие характеристики. Идеальное топливо, дающее максимальную энергетическую отдачу, должно состоять из элементов начала таблицы Менделеева. Но это еще не все требования к топливу: 1) оно должно быть стабильным при хранении; 2) конструкционные материалы должны быть инертными по отношению к топливу; 3) топливо должно быть недорогим; 4) плотность топлива должна быть максимально большой (чем больше масса топлива, тем дольше работает двигатель и т.д.). Кроме топлива ракета везет с собой и окислитель.

Немецкие ракетчики в качестве горючего применили этанол, а окислителя – жидкий кислород. Дальность полета ракет ФАУ-1 и ФАУ-2 составила 270 км. Эти ракеты стали наивысшим достижением ракетной техники того времени.

Затем эстафетную палочку перехватили наши ракетчики. Баллистические ракеты Р-1, Р-2, Р-5, созданные в КБ С.П.Королева, доказали советскому руководству перспективность этого вида оружия, но снова подтвердилось, что жидкий кислород – неподходящий окислитель. Даже успешное испытание ракеты Р-5М с ядерной боеголовкой не убедило военных. Ведь каждую ракету надо было заправлять перед стартом. Ракетчики же требовали топливо, которое бы стабильно хранилось в диапазоне температур от –55 °С до +60 °С.

Расчеты показали, что если взять в качестве горючего дизельное топливо, а в качестве окислителя – азотную кислоту, то дальность полета возрастет на 25 %, т.е. достигнет 330–340 км.

**А**зотная кислота очень подходила на роль окислителя, но... В чем хранить эту чрезвычайно агрессивную жидкость? Такой посуды в 1930–1940 гг. не было. Не делать же баки для окислителя из стекла? Хотя соли азотной кислоты (нитраты) уже давно использовались в пороховых ракетах.

Молекула азотной кислоты  $\text{HNO}_3$  – почти идеальный окислитель. Она содержит в качестве “балласта” атом азота и “половинку” молекулы воды, а два с половиной атома кислорода можно использовать для окисления топлива. Но не тут-то было! Дело в том, что концентрированная азотная кислота – “хитрое” химическое соединение, настолько странное, что постоянно реагирует само с собой. Как говорят химики, концентрированная азотная кислота сильно автоионизирована. Атомы водорода от одной молекулы кислоты отщепляются и присоединяются к другой, образуются при этом очень непрочные, но чрезвычайно агрессивные химические соединения. Из-за этого даже чистая азотная кислота, оказывается, содержит примеси! Очень трудно при этом подобрать конструкционные материалы для баков, труб, камер сгорания ЖРД.

Однако азотная кислота имеет также неоспоримые достоинства: она очень дешева, достаточно стабильна, пожаро- и взрывобезопасна, трудно испаряется.

Почти 20 лет искали подходящую тару для азотной кислоты. Но даже самые стойкие сорта нержавеющей стали медленно, но верно разрушались под воздействием концентрированной азотной кислоты, и на дне бака осаждался густой зеленоватый “кисель” из солей металлов, который ни в коем случае нельзя подавать в камеру сгорания – он моментально забьет ее и ЖРД взорвется. (И взрывались – вспомним аварии с МЕ-262, МИГ-9, Скайрокет, Р-2, Р-5 и т.д.) Для уменьшения коррозионной активности азотной кислоты ракетчики испытывали различные присадки, пытались методом проб и ошибок найти оптимальный вариант. Но удачная добавка была найдена только в конце 1950-х гг. Наши ученые задержались в этом вопросе еще лет на 15. Оказалось, что добавка всего 0,5 % плавиковой (фтороводородной) кислоты уменьшает скорость коррозии нержавеющей стали в 10 раз!

Однако в первом советском ракетном истребителе БИ-1 были использованы для полетов азотная кислота и керосин. Баки и трубы пришлось изготавливать из монель-металла – сплава никеля и меди. Этот сплав получали из некоторых полиметаллических руд, он стал очень популярным конструкционным материалом у ракетчиков. Советские рубли были почти на 95 % сделаны из этого сплава. Правда, во время войны не хватало и нержавеющей стали, и меди, и никеля. Использовали сталь, которую покрывали хромом. Тонкий слой хрома быстро проедался кислотой, поэтому после каждого запуска двигателя авиамеханики проделывали неприятную процедуру – скребками соскабливали остатки топливной смеси в камере сгорания, дыша поневоле ядовитыми парами. Летчик-испытатель В.Л.Расторгуев рассказывал: летать на ЯК-15 с ЖРД-ускорителем – все равно, что “с тигрицей целоваться”. Кабина истребителя часто заполнялась ядовитыми парами кислоты.

Помимо антикоррозионной добавки в кислоту стали добавлять вещества, которые повышали ее эффективность как окислителя. Наиболее подходящим веществом оказался диоксид азота  $\text{NO}_2$ . Он тоже обладает рядом интересных химических свойств: при обычных условиях – это газ бурого цвета, с очень резким неприятным запахом, но стоит только его немного охладить, как он превращается в жидкость. Две молекулы  $\text{NO}_2$  сцепляются, и получается тетраоксид азота  $\text{N}_2\text{O}_4$ . При атмосферном давлении азотный тетраоксид кипит при температуре +21 °С, а замерзает при –11 °С. При температурах, близких к точке затвердевания, цвет соединения становится бледно-желтым, а в твердом состоянии тетраоксид азота почти бесцветен. Подобные превращения происходят потому, что газ состоит почти целиком из молекул оксида, жидкость – из молекул оксида и тетраоксида, а твердое вещество содержит только двойные молекулы тетраоксида.

Какую пользу приносит добавка тетраоксида азота в азотную кислоту? Во-первых, уменьшается коррозионная активность, во-вторых, растет плотность раствора окислителя (в бак входит бо́льшая масса топлива), достигая максимума при содержании тетраоксида 14 %. Такой вариант окислителя выбрали в США.

А наши ракетчики поступили иначе. Надо было догонять США любой ценой, поэтому окислители советских марок – АК-20 и АК-27 – содержали 20 и 27 % тетраоксида.

Сделаем небольшое добавление: секунды любят счет! Немного технической физики в рассказе не помешает. Эффективность работы реактивных двигателей измеряется удельным импульсом (тягой) двигателя. В системе СИ удельный импульс измеряется в м/с, но инженеры упрямо держатся за старые единицы. Тяга измеряется традиционно в килограммах силы кгс (1 кгс = 9,8 Н), а расход рабочего тела, разумеется, – в килограммах массы (кг). Получаем размерность удельного импульса – (кгс/кг)·с. Тогда удельный импульс принимает очень наглядный физический смысл: это тяга в килограммах силы, развиваемая при выбросе рабочего тела в 1 кг за 1 с. Наибольшее количество тепла выделяется при сжигании чистого водорода в чистом кислороде. Такой двигатель и имеет самый большой удельный импульс – 450 с (такой удельный импульс имеют двигатели “шаттлов”). Для двигателя РД-107 (Россия, создан для межконтинентальной баллистической ракеты) он составляет 314 с, двигателей второй ступени ракеты Титан-4 (США) – 316 с, твердотопливных двигателей евrorакеты Ариан-5 – 217 с.

**О**тличный окислитель был найден, но надо было подобрать и отличное топливо.

Требовалось, чтобы при поступлении в камеру сгорания компоненты самовоспламенялись.

Проблема состоит в том, что ни керосин, ни бензин, ни дизельное топливо при непосредственном контакте с азотной кислотой не самовоспламеняются.



*Старт ракеты с космическим кораблем “Союз” (Байконур)*

*Фото с сайта <http://lensart.mhost.ru/picturecontent-pid-136a5.jpg>*

Вот такая “веселая” процедура предшествовала пуску первой межконтинентальной ракеты Р-7. (Она, кстати, вывела на орбиту корабль с Ю.А.Гагариным на борту.) В ней использовалась топливная пара: керосин – жидкий кислород. При подготовке ракеты к пуску требовалось вручную вставить в каждое сопло (их всего-то 32! 20 маршевых сопел и 12 рулевых) зажигательные шашки с проводами, которые их воспламеняют, выверить подачу импульса. (Не дай бог, зажигание пройдет неодновременно, и тогда неизбежен взрыв на стартовом столе, гибель космонавтов. Еще хуже, если это боевая ракета с ядерным зарядом.) Кроме этого надо было провести массу проверочных тестов.

Уже для ракеты Р-12 было предусмотрено самовоспламенение горючего при контакте с азотной кислотой. Время подготовки ракеты к запуску сократилось с 72 ч до 2 ч. Правда, потребовалась добавка третьего компонента. Если это коммерческий запуск, такой вариант приемлем, а для боевой ракеты – нет.

**Х**имикам помогли “гиперголики”. Что это такое?

Гиперголики – вещества, которые имеют чрезмерное сродство друг с другом.

Химики установили, что лучше всего воспламеняются в контакте с азотной кислотой те вещества, которые имеют в своем составе углерод, водород и азот. Но лучше, меньше, больше и т.д. – это не научный язык. Ученому требуется количественная оценка. И еще один “сюрприз” преподнесли гиперголики – задержка зажигания.

А если горючего и окислителя в камере скопилось много, что тогда? Сметает все, что есть поблизости. (Примеров много, но самый трагический – взрыв ракеты Р-16 в 1960 г. на испытаниях на Байконуре – унес жизни более 100 человек, не считая отравленных, обожженных и раненых. Тогда погибло несколько генералов и главнокомандующий Ракетных войск маршал М.И.Неделин.)

В ходе лабораторных исследований было установлено: есть прекрасный гиперголик – гидразин ( $N_2H_4$ ), физические свойства у него очень напоминают аналогичные параметры воды. Температура плавления равна +1,5 °С, кипения – +113 °С, плотность на несколько процентов выше, вязкость и другие параметры – такие же. Правда, запах очень уж специфический. Гидразин был открыт в конце XIX в., а для заправки ракет его применили в Германии в 1933 г., но в качестве добавки для самовоспламенения.

Кроме полезных свойств, гидразин обладает и рядом недостатков с точки зрения ракетчиков: он дорог, его точка замерзания выше, чем у воды. Как в автомобильный радиатор заливают антифриз, понижающий точку замерзания жидкости в нем, так для гидразина потребовалось такое же вещество. Этим веществом оказался спирт (этанол). Вернер фон Браун при запуске первого в США спутника “Эксплорер” применил “гидин” – смесь 60 % гидразина и 40 % спирта. Такое горючее улучшило разгонные характеристики первой ступени, но за все надо платить, пришлось изрядно удлинить баки. Гидразин может дать удельный импульс в районе 300 секунд.

Поиски различных видов топлива в СССР и США шли почти одинаковым путем, но если наши ракетчики делали ставку на жидкостные ракеты, то в США решили строить твердотопливные ракеты. В СССР химики открыли несимметричный диметилгидразин (НДМГ). К великому сожалению, это очень ядовитое вещество. Обычный противогаз не защищал личный состав от отравлений. Пришлось использовать изолирующий костюм или специальный патрон, который снижал концентрацию НДМГ до безопасных пределов.

Метилированные производные гидразина были менее взрывоопасны, меньше впитывали водяные пары, повысилась термостойкость.

Но появились и недостатки: температура кипения понизилась, снизилась и плотность.

**А** дальше ракеты спрятались в шахты, для защиты от первого удара противника. Там, как известно, температура выше нуля. Стало быть, можно использовать чистый тетраоксид азота, который кипит при комнатной температуре. Давление в ракетных баках выше атмосферного, и температура кипения выше. Коррозия баков и трубопроводов уменьшилась настолько, что заправленную ракету стало возможно хранить годами. Ракета УР-100, изготовленная в КБ В.Н.Челомея, была в боеготовности на протяжении 10 лет. Через год на вооружение поставили ракету Р-36 КБ М.И.Янгеля, ныне исправно несет службу ее последняя модификация Р-36М2.

Теперь можно сказать, что у двух пар: жидкий кислород–керосин и тетраоксид азота–несимметричный диметилгидразин (НДМГ) рабочие параметры очень близки, т.е. удельные импульсы почти одинаковы, но вот применение их различно.

Пару кислород–керосин применяют в мирном космосе. Она выводила корабли “Прогресс” и “Союз-ТМ”, она же выводила в космос “Аполлоны” по направлению к Луне.

Вторая пара работала в ракетных частях. Главное достоинство ЖРД – очень точное наведение на цель. Современная ракета Х-55 имеет отклонение от цели (при дальности полета 3000–4000 км) всего 46 метров. Она аналогична ракете США AGM-86В ALCM. Массы их почти одинаковы, тогда и боезаряды должны быть равны. А у ракеты США стоит боеголовка, эквивалентная 200 кг ТНТ (тринитротолуол). Можно промахнуться и на 300 метров! Но пусть лучше вторая пара совсем не работает или работает виртуально в играх генералов, а первая пара работает на благо мира.

#### Л и т е р а т у р а

Военная авиация. Справочник. Кн. 2. Минск: Попурри, 2000; *Ненахов Ю.Ю.* Чудо-оружие третьего рейха. Минск: Харвест, 1999; *Remy H.* Lehrbuch der anorganischen Chemi. В. 1. Leipzig, 1965.

**В.А.ХАМИТОВ,**  
**п. Октябрьский, Пермский край**