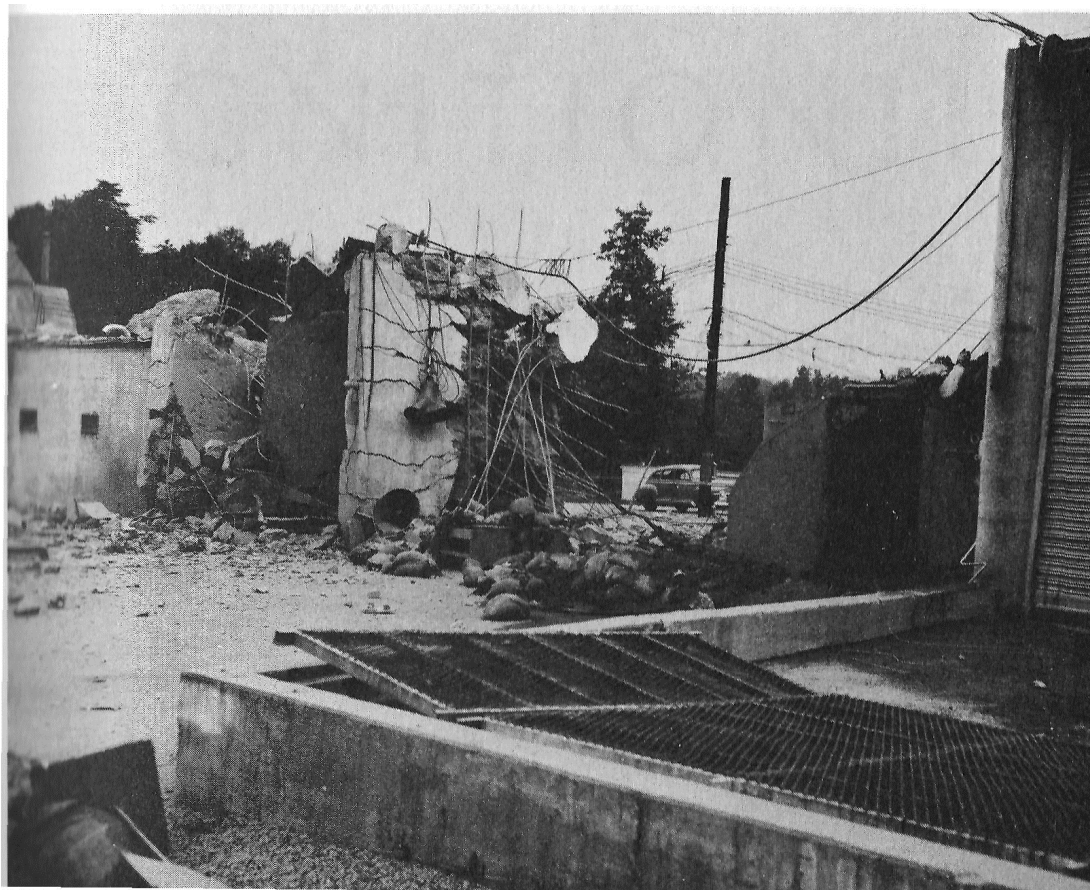


ЗАЖИГАНИЕ!



Фотография ВМФ США

Это демонстрация того, как тестовый прожиг *должен* выглядеть. Обратите внимание на скачки уплотнения в исходящем потоке.



Фотография ВМФ США

А это пример того, как испытание может выглядеть если что-то пошло неправильно. Показан тот же самый испытательный стенд, или его останки.

ЗАЖИГАНИЕ!

Неформальная история жидкого ракетного топлива.

Джон Д. Кларк

Перевод с английского
Д.С. Катаева

Кто не помнит своего прошлого, обречен пережить его вновь.

Джордж Сантаяна



RUTGERS UNIVERSITY PRESS
New Brunswick, New Jersey

Copyright ©1972 by Rutgers University, the State University of New Jersey
Library of Congress Catalog Card Number: 72-185390
ISBN: 0-8135-0725-1
Manufactured in the United States of America by Quinn & Boden Company, Inc.,
Rutherford, New Jersey

Эта книга посвящена моей супруге Инге, принуждавшей к написанию женскими замечаниями вроде – «Ты рассказываешь чертовски интересные истории. Теперь же усаживайся, наконец, за печатную машинку и напиши эту проклятую книжку».

Относительно Джона Д. Кларка

от Айзека Азимова

В первый раз я встретил Джона в 1942 году, переехав жить в Филадельфию, и, к слову сказать, мне уже было известно *о нем* до этого. Некогда, в 1937 году, он опубликовал пару коротких научно-фантастических рассказов «Минус планета» и «Космический блистер», ударивших меня прямо промеж глаз. Первый из них, в частности, был самым ранним известным мне научно-фантастическим произведением, реалистично описывающим взаимодействие с «анти-материей».

Судя по всему, Джон был удовлетворен этой парой рассказов и не писал больше никакой научной фантастики, дружелюбно оставив место для менее ярких личностей типа меня самого.

Поэтому, встретив его в 1942 году, я был готов испытать благоговение, Джон, однако, не был готов к этому со своей стороны. Он был в точности тем, кем всегда являлся – чрезвычайно дружелюбным, совершенно незадающимся, абсолютно самым собой.

Он был моим другом в тот самый момент, когда я отчаянно в этом нуждался. Америка только вступила в войну, и я прибыл в Филадельфию для работы на ВМФ в качестве химика, *первый раз* в жизни покинув дом и едва справив двадцать второй день рождения. Я был крайне одинок, и его дверь всегда была открыта для меня. Он поддерживал меня, когда я был испуган, и ободрял в момент грусти.

Однако при всей своей доброте Джон не всегда мог избежать искушения пошутить над новичком.

Каждая стена его квартиры была заставлена книгами – от пола до потолка, и он любил показывать их мне, объясняя, что у одной стены находится фантастика, у другой история, ещё у одной книги по военному делу и т.д.

«Здесь», он сказал, «располагается Библия». Потом, с серьёзной миной на лице, добавил – «Я поставил ее в раздел фантастики, как ты можешь заметить, под буквой И.»

«Почему И?» – спросил я?

И Джон, полностью насладившись моментом, ответил – «И – для Иеговы».

Но прошли годы, и наши пути разошлись. Война закончилась, и я вернулся в округ Колумбия для получения своей докторской степени (которая уже была у Джона на момент нашего первоначального знакомства), Джон же удачно занялся разработкой ракетного топлива.

Сейчас уже ясно, что любой, работающий в этой области, является форменным безумцем. Я имею в виду не заурядное сумасшествие или какие-нибудь проделки лунатика, а говорю о невообразимой степени умопомешательства.

В целом, некоторые химические вещества сокрушительно взрываются, некоторые жадно горят, некоторые дьявольски коррозионные, некоторые тайком отравляют, и некоторые зловонно воняют. И насколько мне известно, только жидкие ракетные топлива обладают всеми этими милыми свойствами замечательно собранными вместе в едином букете.

В итоге, Джон Кларк работал с данной колдовской смесью и остался целым и невредимым. Более того, он флиртовал с этими жидкостями из Ада в лаборатории

в течение семнадцати лет и не имел ни единого фатального происшествия.

По моей теории, им была заключена сделка с Всемогущим, и в обмен на Божественную защиту Джон согласился убрать Библию из раздела фантастики.

Так что прочитайте эту книгу. Вы найдете много интересного о Джоне и всех остальных не от мира сего, кто работал с ним, вы даже сможете (подобно мне) мельком ощутить тот героический восторг, что оправдывает ежедневные танцы со смертью – не говоря уже о том, что чертовски много узнаете о *реальных* путях развития науки.

И только Джон мог рассказать эту историю достаточно саркастично и, в то же самое время, глубоко.

Предисловие

Миллионы слов были написаны о ракетной технике и путешествиях в космос, и почти столько же об истории создания ракет. Но стоит кому-либо заинтересоваться параллельной историей разработки ракетного топлива – горючего и окислителя, приводящих ракету в движение – как обнаружится, что не имеется книг, рассказывающих то, что хотелось бы узнать. Есть несколько текстов, описывающих топливо, используемые в настоящее время, но нигде не найти ответа на вопрос, *почему* именно указанное топливо, а не какое-то другое, заправляется в Сатурн V, Титан II или Р-36. В данной книге я попытался сделать эту информацию доступной и рассказать историю создания различных видов жидкого ракетного топлива: кто, когда, где, как и зачем их разрабатывали. История твердого ракетного топлива должна быть описана кем-то другим.

Следующее обстоятельство является благоприятным для книги подобного рода. Исследование жидкого топлива, будучи активным в конце 40-ых, в 50-ых и в первой половине 60-ых, застопорилось, и настоящее время видится подходящим для подведения итогов, хотя люди, выполнявшие соответствующую разработку, всё ещё ищут ответы на поставленные вопросы. Все, у кого мне довелось собирать информацию, были более чем готовы помочь, практически запрыгивая на колени и пытаясь лизнуть в лицо. Я заполучил кладёз неофициальной и весьма бесценной информации, которая иначе просто бы осталась в памяти её владельцев. Как один из них написал – «Какая же это замечательная возможность возобновить остановленную вражду» – и я с ним совершенно согласен.

Мои источники были разнообразны. Отчеты о выполненных (иногда!) работах, выпущенные подрядчиками и правительственными агентствами, опубликованные сборники, представленные на различных встречах, воспоминания участников событий, разведывательные отчеты – всё было пущено в ход. Поскольку данная книга является не формальным описанием, а неформальной попыткой активных участников рассказать историю в том виде, как она происходила, я не получал доступа к официальной документации. К тому же, во многих случаях такая документация была бы недоступной – если не сказать даже, что просто опасной. Да и не только репортер должен защищать свои источники.

И, конечно же, я делал наброски, базируясь на собственных записях и воспоминаниях. В течение чуть более чем двадцать лет, начиная с 1 ноября 1949 года, когда я присоединился к «Испытательной станции воздушных ракет ВМФ США», и заканчивая 2 января 1970 года на момент моего ухода на пенсию из её наследника «Лаборатории реактивного движения жидкотопливных ракет арсенала Пикатинни», я был членом неофициального, но очень значимого сообщества жидкого топлива и был полностью в курсе всех дел в этой области как в своей

стране, так и в Англии. (До конца 50-ых было невозможно узнать много о таких работах в Советском Союзе, и деятельность в данной области вне указанных трёх стран была несущественной.)

Эта книга написана не только для заинтересованного непрофессионала – и для него я попытался описывать детали настолько просто, насколько это было возможно – но также и для инженера, специализирующегося в ракетной области, кто, согласно моим наблюдениям, часто проявляет крайнее невежество в области истории своей же собственной профессии и, не будучи принудительно остановленным, почти наверняка делает что-то, что, как мы выяснили лет пятнадцать назад, не только является глупым, но и, вероятно, приведет к катастрофе. Сантаяна точно знал, о чем говорил.

Таким образом, была описана не только блестяще задуманная программа исследований и разработки, но и равное время посвящено тем, кто, мягко говоря, не был хорошо известен. Также я рассказал историю триумфа исследований топлива и описал многочисленные тупиковые пути, в которые время от времени утыкалось по дороге топливное сообщество.

Эта книга самоуверенна. Я не стеснялся давать свое собственное мнение о программе, сведениях (или их отсутствии) и о предложениях, сделанных различными личностями. Не хочу за это извиняться и могу уверить читателя, что подобный критицизм не был основан на том, что задним умом все крепки. В процессе написания этой книги, в одном из мест приведя предложения конкретного человека в довольно саркастической манере, я размышлял, испытывались ли такие же эмоции в тот момент, когда эти предложения были сделаны. Покопавшись в своих (очень личных) заметках, я обнаружил, что описал их тогда просто-напросто как «Мозговой штурм и коровье мычание». Таким образом, моё мнение не поменялось – ну или по крайней мере, незначительно.

Не утверждая полную завершенность, я попытался представить аккуратную подачу материала для основных линий исследования. Если кто-то подумал, что его работа была проигнорирована без особого резона, или помнит вещи в свете, отличном от моего, то позволим ему написать мне, и материал будет исправлен в следующей (возможно) редакции книги. И если же так покажется, что происшедшее в моей лаборатории было неосознанно выделено, то причина вовсе не в её необычности (которой на самом деле не было, хотя и замечательные события чаще случались в нашей лаборатории, чем в большинстве других), а скорее хороший пример того, что могло иметь место в дюжине других лабораторий одновременно по всей стране.

Упоминание чьих-то имен, признаюсь, не имеет системы. Сам факт приведения чьей-либо фамилии вместе с именем вместо инициалов означает только лишь тот факт, что я очень хорошо знаю указанного человека. Титулы и степени в целом игнорируются – учёные степени вообще мало что значат при нашей работе. И тот факт, что какой-то человек упоминается в рамках одной организации в текущей главе, и в другой в следующей части, не должен приводить к затруднению – люди в нашем деле всегда часто меняли работу. Мне кажется, что я установил рекорд особого рода, работая в одной и той же организации в течение двадцати лет.

Еще одно обстоятельство, стоящее упоминания, состоит в том, что данная книга описывает небольшое количество людей. Топливное сообщество – включая ру-

ководящий состав и привлеченных к исследованиям и разработке жидкого топлива – не было многочисленным. Оно включало, самое большее, пару сотен человек, три четверти из которых всего-лишь работали руками, выполняя то, что оставшаяся четверть велела им делать. Эта меньшая часть была чрезвычайно интересной и замечательной группой людей, включая удивительно небольшое число придурков или жуликов по сравнению с большинством групп такого же размера. Мы все, конечно же, знали друг друга, и, как результат, неформальное распространение информации носило характер вспышки молнии. Я был в особенном выигрыше в виду того, что, работая на дядю Сэма, а не на конкурирующего подрядчика, не испытывал проблем с получением «частной» информации от кого-либо. Если мне нужны были секретные сведения, я знал, что смогу получить их в баре во время следующей встречи (многие крупные конференции в области топлива проходили в отелях, чьи управляющие с пониманием дела всегда устанавливали стойку бара сразу за залом встреч. Если конференция не проходила в отеле, я попросту оглядывался вокруг в поиске заведения с коктейлями, и нужный мне человек скорее всего уже был там. Я садился рядом с ним и, заказав выпить, спрашивал – «Джон, что *на самом деле* произошло во время твоего крайнего прожига? Конечно же, я читал твой отчет, но я сам пишу отчеты и знаю им цену. Что же случилось на самом деле?» и мгновенно получал точную информацию без всяких осложнений.

В нашей группе было тяжело найти конформистов, практически все являлись ярко выраженными индивидуалистами. Иногда происходило объединение личностей, иногда нет, и управленцы должны были принимать это во внимание. Когда Чарли Тэйл покинул Wyandotte, и Луи Рап ушел из Reaction Motors, и они вместе присоединились к Аэроджет, управленцы последней с удивительной прозорливостью расположили одного из них в Сакраменто и другого в Азусе, разнеся обоих практически на величину штата Калифорния. Луи повел себя совершенно в своем духе, когда Чарли предоставил доклад на конференцию, и добавил одну или две неприличных картинки в набор слайдов. Чарли же при этом даже не удивился.

Но будучи друзьями или нет, страдая ли от распрей, всё, что мы делали, было на виду у остальных членов сообщества. Мы не только были в состоянии интеллектуального соперничества в духе «всё, что ты можешь сделать, я могу сделать еще лучше», но и знали, что только другие представители нашей группы могут оценить *нашу* работу. Управленческий персонал редко обладал технической подготовкой, и так как большинство результатов было засекречено, мы не могли их публиковать для широкого научного сообщества. Так что внутренняя похвала соответствующим образом оценивалась (когда Ирв Гласман, представляя статью, привел фразу «классическая работа Кларка по чувствительности к взрыву», я оказался на неделю на седьмых небесах. *Классическая* – уже!). В результате образовался своего рода нежелательный групповой нарциссизм, который, тем не менее, чертовски заставлял нас работать.

Как бы то ни было, мы делали то, что делали. Мы были в новой и увлекательной области исследований, возможности были неограниченны, и весь мир был ракушкой, готовой к открытию. Мы знали, что не обладали ответами на стоящие перед нами вопросы, но были совершенно уверены в своих силах быстро разрешить их со «смаком» – единственным подходящим для описания словом – чего я не видел ни до, ни после. Таким образом, дорогие друзья и заклятые противники,

позвольте мне сказать – «Господа, я благодарен судьбе за знакомство с Вами!»

Джон Д. Кларк

Ньюфаунленд, Нью Джерси

Январь 1971

Оглавление

Относительно Джона Д. Кларка	4
Предисловие	7
1 Как всё начиналось	13
2 Пенемюнде и ЛРД	21
3 В погоне за Гиперголом...	33
4 ... и его подружкой	53
5 Вечная подружка невесты перекись	71
6 Галогены, политика и дальний космос	77
7 Эффективность	95
8 Криогеника	107
9 Что делал Ваня	119
10 «Экзотика»	125
11 Многообещающие монотоплива	135
12 Высокая плотность и высочайшая глупость	175
13 Что будет дальше	189
Список сокращений	193
Предметный указатель	195

Глава 1

Как всё начиналось

Возлюбленная Королева в конце концов вознеслась на небеса, и король Эдуард VII необычайно собой восхищался, правя Империей, над которой никогда не заходило солнце. Кайзер Вильгельм II в Германии строил линкоры и делал неосторожные замечания, а в Соединенных Штатах Президент Теодор Рузвельт делал неосторожные замечания и строил линкоры. Это был год 1903, и перед его окончанием первый самолёт братьев Райт неуверенно поднялся в воздух. А в городе Санкт-Петербург при правлении Царя всея Руси журнал «Научное обозрение» опубликовал статью, не привлекая абсолютно никакого внимания.

Её впечатляющим, но не слишком информативным названием было «Исследование мировых пространств реактивными приборами», и автор Константин Эдуардович Циолковский работал незаметным школьным учителем в таком же малоизвестном городе Боровск Калужской губернии¹.

Суть статьи может быть изложена в следующих пяти простых утверждениях:

1. Космические путешествия возможны.
2. Они могут осуществляться при помощи, и *только* при помощи ракетного движения в силу того, что лишь ракеты являются известными средствами передвижения, способными работать в безвоздушном пространстве.
3. Пороховые ракеты не годятся для этой цели, так как черный порох (а, в данном случае, также и бездымный порох) попросту не обладают необходимой энергетикой.
4. Некоторые жидкости обладают нужной энергией.
5. Жидкий водород должен быть подходящим горючим, жидкий кислород подходящим окислителем, и данная комбинация должна быть практически идеальной топливной парой.

Первые четыре утверждения могли бы вызвать поднятие нескольких удивленных бровей в том случае, если бы хоть кто-то их выслушал. Но никто этого не сделал, и всё было встречено глухой тишиной. Пятое утверждение было совершенно

¹Прим. перев. На самом деле в 1903 году К.Э. Циолковский жил в Калуге, куда он переехал с семьей из Боровска в 1892 году.

другого рода, и за несколько лет до этого показалось бы не только удивительным, а попросту бесполезным, так как жидкий водород и кислород были новинками во всём мире.

Начиная с Майкла Фарадея в 1823 году, ученые по всей Европе пробовали сжижать различные распространенные газы – охлаждая их, сжимая или комбинируя оба процесса. Хлор поддался первым, затем были аммиак, углекислый газ и множество других газов, и к семидесятым годам только несколько упрямцев упорно сопротивлялись сжижению. В их число входили пессимистично названные неконденсирующимися кислород, водород и азот (фтор ещё не был выделен, а инертные газы открыты).

Так было до 1883 года, когда в апреле этого года Сигизмунд Флорентий Врублевский из Краковского Университета в Австрийской Польше анонсировал Академии Наук Франции, что ему совместно со своим коллегой К. С. Ольшевским удалось получить сжиженный кислород. Для жидкого азота это было проделано несколько дней спустя, для жидкого воздуха же в течение двух последующих лет. К 1891 году жидкий кислород стал доступен в лабораторных количествах, и к 1895 году Линде разработал практичный полномасштабный процесс производства жидкого воздуха. Жидкий кислород (как и жидкий азот) мог быть выделен из него путем простой фракционной дистилляции.

Джеймс Дьюар (позднее сэр Джеймс и изобретатель дьюаровского сосуда и, таким образом, термоса) из Лондонского Королевского Института получил в 1897 году жидкий фтор, изолированный Мойсоном всего за 11 лет до этого, и определил, что плотность жидкости составляла 1,108. Это совершенно (и необъяснимо) ошибочное значение (на самом деле плотность была равна 1,50) было надлежащим образом зафиксировано в литературе и оставалось неоспоримым в течение почти шестидесяти лет, приведя к путанице практически для всех.

Последний крупный уклонист – водород – в конце концов поддался приложенным усилиям Дьюара и был сжижен в мае 1898 года. И как он триумфально заявил – «Тринадцатого июня 1901 года пять литров вещества (жидкого водорода) было благополучно доставлено по улицам Лондона из лаборатории Королевского Института в помещение Королевского Общества!»

И только *тогда* Циолковский написал о космических путешествиях на ракете, приводимой в движение жидким водородом и кислородом. Без работ Врублевского и Дьюара для Циолковского просто не было бы предмета разговора.

В следующих статьях Циолковский рассмотрел другие возможные ракетные горючие – метан, этилен, бензин, метиловый и этиловый спирт, скипидар, бензин, керосин – почти всё, что может быть залито и подожжено, но, вероятно, он не принимал во внимание окислители, отличные от жидкого кислорода. И хотя Циолковский непрерывно писал до дня своей смерти в 1935 году, его ракеты оставались на бумаге, и он *не делал* ничего на практике. Первым человеком, занявшимся этим, был Роберт Годдард.

Еще в 1909 году доктор Годдард размышлял о жидкотопливных ракетах и пришел к тем же выводам, что и его российский предшественник (о котором он не слышал), а именно о том, что жидкий кислород и водород являются почти идеальной топливной парой. В 1922, состоя в качестве профессора Университета Кларка, он начал экспериментальную работу над жидкотопливными ракетами и их ком-

понентами. Жидкий водород был практически недоступен в те дни, и Годдард работал с бензином и жидким кислородом, парой, которой он пользовался во всей своей последующей экспериментальной работе. К ноябрю 1923 года он запустил ракетный двигатель на тестовом стенде, и 16 марта 1926 года выполнил первый полет жидкотопливной ракеты, пролетевшей 55 метров за 2,5 секунды. Стоит отметить, что ровно через 40 лет в тот же день Армстронг и Скотт отчаянно боролись за возвращение под контроль бешено вращающегося Джемини 8.

Одним из странных аспектов ранних работ Годдарда с бензином и кислородом было очень низкое используемое соотношение окислителя к горючему. Для каждого сожженного им килограмма бензина Годдард тратил около 1,3 или 1,4 килограмма кислорода, при том что 3 килограмма было бы ближе к оптимуму. В результате, его двигатели имели низкую эффективность и редко достигали значения удельного импульса выше, чем 200 секунд. Скорее всего, пониженное соотношение использовалось для уменьшения температуры горения и увеличения продолжительности работы оборудования, т.е. попросту для предохранения двигателей от прогорания.

Начиная с 1923 года, движущей силой следующего поколения экспериментаторов стала книга некоего неизвестного трансильванского немца Германа Оберта. Названием было *Die Rakete zu den Planetenräumen*, или *Ракета для межпланетного пространства*, и книга удивительным образом стала своего рода бестселлером. Люди начали думать о ракетах (практически никто не слышал о Годдарде, работавшем в обстановке исключительной и избыточной секретности), и некоторые решили начать что-то делать в этой области. Сначала были созданы сообщества. *Verein für Raumschiffahrt*, или Товарищество космических путешествий, широко известное как VfR, было организовано первым в июне 1927 года. Американское межпланетное общество было основано в начале 1930 года, Британское межпланетное общество в 1933 году, и две советские группы – одна в Ленинграде и одна в Москве, в 1929 году. В дальнейшем, о ракетах и межпланетных путешествиях читались лекции и писались книги и, возможно, самой важной из них была чрезвычайно детальная книга Роберта Эсно-Пелтери *L'Astronautique*, изданная в 1930 году. Фритц Ланг снял фильм о космическом путешествии под названием *Frau im Mond*, или *Женщина в космосе*, и нанял Оберта в качестве технического консультанта. Было принято соглашение, что Ланг и киностудия (UFA) выделяют деньги, необходимые для разработки и постройки Обертом жидкотопливной ракеты, которая должна была бы быть запущена в качестве эффектного представления в день премьеры фильма.

Взаимоотношения Оберта с киноиндустрией (как, впрочем, и наоборот) являются отличным представлением в театре абсурда (который может быть описан в другом месте во всех своих удивительных деталях), замечательным образом приведшим к одному интересному, хотя и преждевременному, вкладу в технологию ракетного топлива. Потерпев неудачу со строительством бензиново-кислородной ракеты ко времени премьеры фильма (доступное время было немыслимо коротко), Оберт разработал ракету, которая, как он надеялся, могла быть быстро создана. Конструкция состояла из вертикальной алюминиевой трубы с несколькими угольными стержнями в центре, погруженными в жидкий кислород. Идея была в том, что угольные стержни сгорали бы с нижнего конца к верхнему с одинаковой

скоростью по мере потребления кислорода, в то время как горячие газы вырывались бы через набор сопел на вершине ракеты, направленной вперед. Оберту не удалось получить работающую конструкцию, которая, возможно, и, скорее всего, неизбежно, должна была взорваться, но это была первая документально зафиксированная конструкция гибридной ракеты с твёрдым горючим и жидким окислителем («обратный» гибрид использует твёрдый окислитель и жидкое топливо.)

В любом случае, премьера фильма состоялась 15 октября 1929 года без подъема ракеты, и VfR после уплаты нескольких счетов наследовала оборудование Оберта и смогла самостоятельно работать с начала 1930 года.

И с этого момента всё стало усложняться. Будучи неизвестными VfR (да и вообще кому-либо), как минимум три группы упорно работали. Ф.А. Цандер возглавлял одну из них в Москве и был авиационным инженером, много (и образно) писавшим о ракетах и космических путешествиях. В одной из своих публикаций он предположил, что космонавт мог бы увеличить запас топлива подобно Филеасу Фоггу. После опустошения топливного бака космонавт мог бы просто измельчить его и добавить полученный алюминиевый порошок в качестве оставшегося горючего, чья теплотворность была бы соответствующим образом улучшена! Это было бы модифицированной имитацией поведения героя романа *Вокруг света за восемьдесят дней*, который после исчерпания запаса угля сжег часть корабля для того, чтобы оставшаяся часть могла продолжать движение. Не слишком неестественным образом эта идея осталась на бумаге, и экспериментальная работа Цандера лежала в менее своеобразном русле. Цандер начал работу в 1929 году, вначале с бензином и газообразным кислородом, а затем, с 1931 года, с бензином и жидким кислородом.

Еще одна группа располагалась в Италии, возглавляемая Луиджи Крокко, и неохотно финансируемая Итальянским Генеральным Штабом.²

Крокко начал работу с жидкотопливными ракетами в 1929 году, и в к началу 1930 года был готов к огневыми испытаниям. Его работа замечательна не только удивительно изощренной конструкцией двигателя, но и всем, что было связано с используемыми им топливами. Он использовал бензин в качестве горючего, что не было необычным, но при этом отказался от кислорода как окислителя в пользу тетраоксида азота N_2O_4 . Это был большой шаг вперед – тетраоксид азота в отличие от кислорода может храниться сколь угодно долго при комнатной температуре – но никто из пределов этой небольшой группы не слышал об вышеуказанной работе в течение 24 лет!³

²Тот факт что весь проект возглавлялся генералом Г.А. Крокко не является простым совпадением. Генерал был отцом Луиджи, и итальянский папа вполне сопоставим с еврейской мамой.

³В письме от 7 октября 1927 года, направленном *Эль Комерсио*, проживавшему в Лиме, Перу, некто Педро А. Паул, перуанский инженер в области химии, утверждал, что он экспериментировал в 1895-97(!) годах с ракетным двигателем, работавшем на бензине и тетраоксиде азота. Если это утверждение имеет под собой хоть какое-то основание, то Паул предвосхитил не только Годдарда, но даже Циолковского.

Однако, следует принять во внимание следующие факты. Паул утверждал, что его двигатель имел тягу в 65 килограмм и работал в пульсирующем режиме с частотой 300 циклов в минуту в отличие от непрерывной работы обычного ракетного двигателя.

Также он утверждал, что выполнял эксперименты в Париже.

Сейчас-то мне известно, насколько громок 65-килограммовый двигатель. И также я знаю, что

Ещё один авиационный инженер В.П. Глушко возглавлял группу ракетчиков в Ленинграде. Он предложил растворить измельченный бериллий в масле или бензине как горючем, но для своего первый прожига в 1930 использовал обыкновенный толуол. И, кроме того, им был независимо сделан тот же следующий шаг, что и у Крокко, для тетраоксида азота в качестве окислителя.

VfR, начиная работу, совершенно ничего не знало об этих группах. Оберт вначале собирался использовать метан в качестве горючего, но в Берлине было тяжело найти данный углеводород, и первоначальные усилия были приложены к бензину и кислороду. Йоахан Винклер, однако, подхватил идею, и, работая независимо от VfR, смог запустить двигатель на жидком кислороде и метане до конца 1930 года. Но эта работа оказалась безрезультатной в виду того факта, что, в частности, метан при слегка лучшей по сравнению с бензином эффективностью гораздо более сложен в эксплуатации, и поэтому никто не видел причин продолжать им заниматься.

Гораздо более важными были эксперименты Фридриха Вильгельма Зандера, пиротехника по профессии (изготавливавшего на продажу ракеты на черном порохе), запустившего двигатель в начале марта 1931 года. Он был несколько скрытен в отношении своего топлива, просто назвав его «носитель углерода», но Вилли Лей предположил, что это вполне мог быть лёгкий мазут или бензин, в котором было растворено значительное количество измельченного углерода или сажи. Как пиротехник Зандер естественным образом мог подумать об углероде *как* горючем, и некто Херманн Ноордунг (что было псевдонимом капитана Поточика из старой Имперской Австрийской Армии) за год до этого предложил суспензию углерода в бензине как горючем. Идея состояла в увеличении плотности топлива, что позволило бы использовать меньший по размеру бак. Важной особенностью работы Зандера был новый вид окислителя – красная дымящаяся азотная кислота (это азотная кислота, содержащая значительное количество – от 5 до 20 процентов – растворенного тетраоксид азота). Эти эксперименты послужили началом одного из главных путей в разработке ракетного топлива.

Эсно-Пелтери, бывший авиационным пионером и инженером в этой области, в течение 1931 года работал с легким бензином и кислородом, а затем с бензином и тетраоксидом азота, став третьим экспериментатором, независимо пришедшим к данному окислителю. Но это стало обычным обстоятельством в разработке ракетных топлив, когда полдюжины экспериментаторов одновременно начинают носиться с одинаковой косточкой в зубах! Использование легкого бензина (как и толуола Глушко) в качестве горючего довольно странно. Ничто из них не имеет преимуществ перед обычным бензином в плане эффективности, и оба эти вещества гораздо дороже. Затем Эсно-Пелтери опробовал тетранитрометан $C(NO_2)_4$ в качестве окислителя и ожидаемо потерял четыре пальца (происшествие, оказавшееся вполне обычным при работе с ТНМ)

если он будет запускаться 300 раз в минуту – в частотой тикающих часов – то звучать это будет как целая батарея автоматических 75-мм зенитных пушек. Такой грохот должен был бы убедить парижан в возвращении Коммуны для отмищения Республике, и *кто-то* кроме Паула обязательно запомнил бы этот факт. Но почему-то это осталось только в памяти Паула.

Поэтому в моей книге его утверждение рассматривается как недостоверное и не имевшее место в действительности.

В Ленинграде В.П. Глушко подхватил эстафету Зандера и с 1932 по 1937 с большим успехом работал с азотной кислотой и керосином, комбинацией, до сих пор используемой в СССР. И в 1937 году, несмотря на широко известный печальный опыт Эсно-Пелтери, Глушко удачно провел прожиг керосина и тетранитрометана. К сожалению, данная работа продолжения не имела.

Позднее, в 1931 году, Клаус Ридель из VfR разработал двигатель для новой комбинации топлива и окислителя и запустил его в начале 1932 года. Двигатель потреблял, как обычно, жидкий кислород, но горючее, придуманное Риделем и Вилли, состояло из 60% этилового спирта и 40% воды. Эффективность смеси была слегка меньше, чем у бензина, но зато температура горения была значительно ниже, охлаждение проще, и вся конструкция работала дольше. В этом состоял наибольший и последний вклад VfR в технологию ракетного топлива, напрямую приведший к А-4, или V-2. Вернер фон Браун начал работать над своей докторской диссертацией, посвященной исследованию реактивного горения, в Куммерсдорф-Весте в ноябре 1932 года при поддержке Сухопутных Войск. В это же самое время гестапо арестовало оставшихся членов VfR, и сообщество прекратило свое существование к концу 1933 года.

Доктор Ойген Зенгер, работавший в Венском Университете, провел продолжительную серию огневых испытаний в течение 1931 и 1932 годов. Использованное им топливо было вполне традиционным – жидкий (и иногда газообразный) кислород и легкие фракции мазута – но он предложил замечательный химический способ запуска двигателя. Часть топливной магистрали, примыкавшая к двигателю, была заполнена диэтилом цинка, в современных терминах служивший «самовоспламеняющимся стартовым горючим». Будучи впрыснутым в двигатель и соприкоснувшись с кислородом, он самостоятельно вспыхивал и обеспечивал плавное горение поступившего топливного мазута. Кроме того, Зенгер первым из многих составил длинный лист возможных горючих, расставленных в порядке от водорода до чистого углерода, и вычислил значения производительности каждого с кислородом и N_2O_5 (последний, впрочем, будучи не только нестабильным, но и ко всему прочему, твердым веществом, естественным образом не был использован). К сожалению, в своих вычислениях Зенгер достаточно наивно предполагал 100% тепловой КПД, что было бы возможно при а) бесконечном давлении в камере сгорания или б) нулевом давлении выхлопа в идеальном вакууме, и в любом случае требовало бы бесконечно длинное сопло, что могло бы привести к неким сложностям при изготовлении (тепловой КПД у ракет колеблется в районе 50-60%). Также было высказано предположение, что озон мог бы использоваться как окислитель, и, вслед за Цандером, алюминиевый порошок мог бы быть добавлен в горючее.

Затем в Италии Луджи Крокко выдвинул ещё одну идею и смог договориться с Министерством Авиации о выделении небольшой суммы для дальнейшей апробации. Идея состояла в монотопливе, являющемся жидкостью, содержащей одновременно и горючее, и окислитель в качестве как единой молекулы типа метилнитрата CH_3NO_3 , где кислород окисляет углерод и водород, так и смеси горючего и окислителя по типу раствора бензина в N_2O_4 . На бумаге идея выглядела привлекательной, только одна жидкость должна была быть впрыснута в камеру сгорания, что упрощало конструкцию двигателя, состав смеси был одинаков и оста-

вался таким, какой пожелается, и не нужно было беспокоиться о конструировании форсунки для соответствующего смешивания горючего и окислителя. В итоге всё значительно упросталось – *Но!* Любая плотная смесь горючего и окислителя потенциально взрывоопасна, и молекула с горючим на одном конце и окислителем на другом, разделенными парой скрещенных пальцев прямо-таки напрашивается на неприятности.

Обо всем этом Крокко знал. Но с особого рода смелостью, которую сложно было бы отличить от диагноза лунатизма, продолжительная серия тестовых прожигов с нитроглицерином (не меньше!), лишь слегка стабилизированным добавлением 30 процентов метилового спирта, была начата в 1932 году. Каким-то чудесным образом ему удалось избежать смерти и расширить работу в направлении чуть менее чувствительного нитрометана CH_3NO_2 . Полученные результаты были многообещающими, но деньги закончились в 1935 году, и ничего особенного далее изучено не было.

Ещё одним ранним исследователем монотоплив был Гарри Булл, самостоятельно работавший в Сиракузском Университете. К середине 1935 года он испытал с газообразным кислородом бензин, эфир, керосин, мазут и спирт. Позже он провел безуспешную работу с прожигом спирта и 30%-ной (что было наибольшей доступной на тот момент в США концентрацией) перекисью водорода и скипидара с (возможно 70-процентной) азотной кислотой. Далее, в 1934 году было опробовано монотопливо собственного изобретения, названное «Atalene», так в дальнейшем и не идентифицированное. Это соединение взорвалось и отправило ученого напрямиком в госпиталь. Занавес.

Также Гельмуд Вальтер из Государственного Химического Института в Берлине в 1934 и 1935 годах разработал двигатель на монотопливе в виде 80% перекиси водорода, ставшей доступной незадолго до этого. С подходящим катализатором или будучи нагретой, перекись водорода распадается на кислород и перегретый пар, и, таким образом, может быть использована в качестве монотоплива. Данная разработка не было опубликована в открытых источниках в виду возможного применения Люфтваффе, но была продолжена и привела к различным результатам в последовавшие годы.

Последней чисто предвоенной работой, стоящей упоминания, была деятельность группы Фрэнка Малины в GALTIC (это аббревиатура для авиационной лаборатории Гугенгейма Калифорнийского Технологического Института). В феврале 1936 года он запланировал проект для своей докторской диссертации, состоявший в разработке жидкотопливной геофизической ракеты. Группа для выполнения этого задания собиралась постепенно и окончательно сформировалась в лету 1937 года: шесть человек, включая самого Малину, Джона Парсонса, бывшего химиком группы, Уилда Арнольда, предоставившего небольшое финансирование и Цянь Сюэсэня, прославившегося тридцать лет спустя в качестве создателя ракетной программы Коммунистического Китая. За всеми ними милостиво присматривал Теодор фон Карман.

Сначала нужно было научиться запускать ракетный двигатель на жидком топливе, и экспериментальные прожиги, выполнявшиеся с этой целью, начались в октябре 1936 года с метанолом и газообразным кислородом в качестве горючего и окислителя. Но и другие топлива были изучены, и к июню 1937 года Парсонс

составил список из дюжины топливных комбинаций с вычисленными значениями производительности (предполагая, подобно Зандеру, 100-процентную эффективность). В дополнение к веществам из списка Зандера были перечислены как различные спирты, так и насыщенные и ненасыщенные углеводороды, и даже такая экзотика, как метаоксид лития, декаборан, гидрид лития и триметилалюминий. В качестве окислителей были приведены кислород, красная дымящаяся азотная кислота и тетраоксид азота.

Следующей топливной парой, опробованной этой группой, были тетраоксид азота и метанол. Тесты были начаты в августе 1937 года, но вместо того, чтобы работать вне помещения, как это бы сделал любой здравомыслящий человек, Малина, будучи неправильно информированным, провел свои испытания в инженерномеханическом корпусе, заполненном, в итоге, парами метанола и N_2O_4 . Последний, прореагировав с кислородом и парами воздуха, попросту превратился с азотную кислоту, оказавшую коррозионное воздействие на всё дорогостоящее оборудование в здании. Популярность Малины среди руководства снизилась головокружительным образом, сам он с аппаратурой и сообщниками был в итоге вышвырнут из здания и впоследствии известен как глава «отряда самоубийц». Как видим, первооткрыватели редко пользуются признанием.

Но группа продолжила работу до первого июля 1939 года, когда по представлению генерала Хэпа Арнольда воздушный корпус Армии США финансировал проект по разработке JATO – ракетного ускорителя, помогавшего тяжело нагруженному самолету взлетать с коротких полос.

С этого момента ракетные разработки стали финансироваться военными и были засекречены. GALCIT потеряла невинность при первом взрыве Малины, сейчас же она утратила и свой любительский статус.

Глава 2

Пенемюнде и ЛРД

Фон Браун начал работать над своей докторской диссертацией, посвященной процессам сгорания в ракете, в ноябре 1932 года. Вся его экспериментальная работа была проведена на Куммерсдорфском полигоне для артиллерийских испытаний недалеко от Берлина, причем рейхсвер оплатил перевозки и сформировал личный состав для обслуживания ракеты. После получения учёной степени в 1937 году фон Браун был назначен на должность технического директора организации, вскоре перемещенной в Пенемюнде. Здесь и была разработана и сконструирована А-4, более известная под пропагандистским названием «V-2».

Лишь незначительные усилия были приложены к разработке топлива для А-4. С самого начала жидкий кислород был выбран как окислитель, и 70-30 водоспиртовая смесь (уже использованная VfR) задействована в качестве горючего; кроме того, 80-процентная перекись водорода Гельмута Валтера предназначалась для привода топливной турбины. Пероксид поступал в камеру разложения, где смешивался с небольшим количеством водного раствора перманганата калия, что вызывало каталитическое разложение на кислород и перегретый пар, приводивших в движение турбины, закачивавшие кислород и спирт в главную камеру сгорания.

Ракета А-4 была стратегическим оружием дальнего радиуса действия, не предназначенным для мгновенного запуска, и с практической точки зрения было идеально установить ракету и заправить её спиртом и кислородом непосредственно перед стартом. Но рейхсверу были необходимы зенитные ракеты, постоянно готовые к действию, ведь если вы получили сигнал от наблюдателей о приближающихся бомбардировщиках, у вас не будет времени для заправки ракеты жидким кислородом. Что в этом случае необходимо, так это долгохранимое топливо, которое можно заправить в баки заранее и хранить вплоть до нажатия кнопки запуска ракеты. Это невозможно сделать с кислородом, остающимся жидким только при температуре ниже -119°C , что является критической температурой при любом приложенном давлении.

Рейхсвер довольно долго вырабатывал требования к зенитным ракетам – возможно, они верили Герману Герингу, когда тот кичился, что «если Британия когда-либо проведет бомбардировку Берлина, можете назвать меня Майером»¹ – но ко-

¹Прим. перев. Цитата не вполне точна, в оригинале Гёринг сказал на радио, что «Wenn auch nur ein feindliches Flugzeug unser Reichsgebiet überfliegt, will ich Meier heißen!» («Если хоть единый

гда это всё-таки произошло, было обнаружено, что работы ещё непочатый край. Первоначально она была сконцентрирована на Witte Werke Гельмуда Вальтера в Киле. Как уже было отмечено, высококонцентрированная (80-83 процента) перекись водорода стала доступна около 1934 года, Вальтер испытывал её в качестве монотоплива, и Люфтваффе, подобно генералу Арнольду в США, чрезвычайно этим заинтересовалось, приняв во внимание тот факт, что стартовый ракетный ускоритель может позволить бомбардировщику взлететь с большей нагрузкой. К февралю 1937 года ракетный ускоритель Вальтера на перекиси водорода помог самолёту Хайнкеля Кадет оторваться от земли. Позже в этом же году полетел самолет, снабженный ракетным двигателем, снова использовавшим пероксид водорода. Наконец, перехватчик Мессершмидт Me-163 приводился в движение тем же топливом.

Но перекись не только монотопливо, но также и довольно эффективный окислитель. И Вальтер разработал горючее для него, названное «C-Stoff» (перекись при этом именовалась «T-Stoff»). Гидрат гидразина $N_2H_4 \cdot H_2O$ самовоспламенялся при контакте с перекисью и, возможно, Вальтер был первым разработчиком топлив, открывшим это явление. В результате, C-Stoff состоял из 30 процентов гидрата гидразина, 57 процентов метанола и 13 процентов воды плюс 30 миллиграмм на литр меди в составе тетрацианокупрата(I) калия, действовавшего как катализатор зажигания и горения. Метанол и вода были выбраны в силу того, что гидрат гидразина был сложен в получении – настолько сложен, что в действительности его процентная доля в C-Stoff была снижена до значения 15. Перехватчик Мессершмидт 163-B использовал C-Stoff и T-Stoff.

Следующей организацией, занявшейся ракетными разработками, был Aeronautical Research Institute в Брауншвайге, где в 1937-1938 годах доктор Отто Лютц и доктор Вольфганг С. Ногератт начали работу над комбинацией C-Stoff-T-Stoff. Далее, БМВ (Баварские Моторные Заводы – да-да, это те же люди, что делали мотоциклы) было приглашено Люфтваффе принять участие в разработке. Гельмуд Филипп фон Збровски, племянник гонщика, прославившегося перед Первой Мировой Войной, был назначен ответственным за проект, и Хайц Мюллер стал его заместителем. Летом 1939 года БМВ получило контракт на разработку стартового ракетного ускорителя, использовавшего комбинацию C-T-Stoff, и работало над ним в течение нескольких месяцев. Но фон Збровски был убежден, что 98-процентная азотная кислота была лучшим окислителем и, к тому же, гораздо более доступным (I.G. Farben гарантировало неограниченные поставки) и смог убедить начальство в своей точке зрения. С начала 1940 года он и Мюллер работали над комбинацией азотной кислоты и метанола и в 1941 году замечательно доказали свою правоту при отличном 30-секундном запуске с тягой на уровне полутонны. Фон Збровски даже доказал это Ойгену Зенгеру, до этого бывшего уверенным в том, что только кислород может рассматриваться в качестве окислителя.

И в это же самое время в начале 1940 года фон Збровски и Мюллер сделали необычайно важное открытие, состоявшее в том, что некоторые горючие (перво-

вражеский самолёт пролетит на германской земле, можете назвать меня Майером»). Фамилия Майер очень распространена в Германии, и примерный смысл можно передать фразой «можете назвать меня Сидоровым».

начально это было обнаружено для анилина и скипидара) самовоспламеняются при контакте с азотной кислотой. Нёгерат выяснил это и присоединился к группе БМВ для дальнейшего поиска горючих с данным интересным свойством. Его условное название для азотной кислоты было «Игнол», горючее было названо «Эргол», и будучи быстроумным парнем с греческими корнями, им было придумано название «Гипергол» для самовоспламеняющихся веществ. «Гипергол» и его производные в качестве прилагательного «гиперголический» стали неотъемлемой частью не только немецкого языка, но также английского, и даже, несмотря на все усилия Шарля де Голля в его стремлении к «чистоте» языка, французского.

Открытие самовоспламенения имело важное значение. Обеспечение работы ракетного двигателя сравнительно простая задача, его выключение без выжигания чего-нибудь более сложно, но вот безопасный запуск является настоящей проблемой. Иногда используются электрические инициаторы, иногда пиротехнические устройства, но ни тому, ни другому нельзя совершенно довериться, и оба метода добавляют трудностей и особенностей поведения к устройству, которое и так сложнее, чем вам хотелось бы. Очевидно, что если комбинация горючего и окислителя является самовоспламеняющейся, то можно выкинуть все иницирующие схемы и устройства, позволить химии совершить всю работу самостоятельно и в целом сделать всё гораздо более простым и надежным.

Но как обычно, на этом пути имеются ловушки. Если горючее и окислитель подаются в камеру сгорания и сразу же загораются, всё идет хорошо. Но если они втекают, собираются в лужицу и только *тогда* воспламеняются, происходит взрыв, который обычно уничтожает двигатель и всё, что его непосредственно окружает. Общепринятым иносказанием для указанной цепочки событий стал термин «жесткий запуск». Таким образом, самовоспламеняющееся горение должно быть *очень* быстрым, иначе же оно даже хуже, чем просто бесполезный эффект. Немцы установили верхний предел в 50 миллисекунд для задержки зажигания, с которой они могли иметь дело.

Между прочим, во избежание возможной путаницы *свои* топлива Збровски именовал названиями растений. Азотная кислота была обозвана как «Salbei» в честь шалфея, и горючее как «Тонка» вслед за бобами, из которых был получен кумарин, пахнущий ванилью. Принимая во внимание запах веществ, с которыми ему пришлось работать, мне едва ли можно представить более неподходящие названия.

Первый тест на задержку зажигания был, если выразиться помягче, слегка примитивным. После длинной ночи, посвященной поиску в старинных текстах по химии веществ, активно реагирующих с азотной кислотой, Збровски и Мюллер намачивали ветошь подходящим кандидатом, разбрызгивали на нее азотную кислоту и наблюдали за тем, насколько быстро (если это вообще происходило) вспыхивало пламя. И они столкнулись с необычайным феноменом, состоявшем в том, что старая использованная ветошь из мастерской иногда реагировала гораздо быстрее, чем новая и пропитанная тем же самым горючим. Химическая лаборатория снабдила их ответом, состоявшем в том, что следовые количества железа и меди из мастерской в форме металла или соли катализировали реакцию горения. Поэтому они модифицировали свою 98-процентную азотную кислоту «Salbei», добавив 6 процентов гидрата хлористого железа, и назвали новый окислитель

«Salbeik».

Указанная ветошная техника была быстро заменена неким более хитроумным устройством, в котором можно было капнуть испытуемое горючее в небольшое количество азотной кислоты и определить его свойства самовоспламеняемости с меньшим риском возгорания во всей лаборатории. Это позволило в течение следующих четырех лет БМВ с одной стороны и Нёгерату с другой проверить на самовоспламеняемость всё, что могло оказаться в их руках. В БМВ, где разработка топлива возглавлялась Германом Хемесадом, было опробовано более 2000 возможных горючих, а вскоре и подразделение I.G. Farben в Людвигштайне начало заниматься тем же самым. С достойным сожаления недостатком воображения эта компания с самого начала тщательно избегала использования кодовых названий и именovala свои смеси кодовыми номерами типа T93/4411.

Разработанные тремя данными организациями топлива были сколь многочисленны, столь и разнообразны, но в тоже время имели много общего в силу ограниченности количества соединений, самовоспламеняющихся с азотной кислотой и доступных в любых количествах. Третичные амины навряд ли триэтиламина были самовоспламеняющимися, ароматические амины, такие как анилин, толуидин, ксилидин и N-метиланилин, обладали этим свойством даже в большей степени. Большинство из опробованных смесей (тогда ещё не слышали об очищенных горючих, состоявших только из одного вещества) базировались на семействе анилинов, часто с добавлением триэтиламина и, время от времени, чего-нибудь вроде ксилола, лёгкого и обычного бензина, тетрогидрофурана, пирокатехина и, изредка, другого алифатического амина. Изготовленное БМВ Тонка 250 состояло из 57 процентов чистого ксилидина и 43 процентов триэтиламина и использовалось в ракете «Тайфун», Тонка 500 содержало толуидин, триэтиламин, анилин, бензин и чистый ксилидин. Нёгерат добавил фуриловый спирт к Тонка 250 для получения «Эрго-60», который он посчитал «лучшим» самовоспламеняющимся горючим и слегка мечтательно доложил, что фуриловый спирт широко доступен в Соединенных Штатах в отличие от Германии.

Как только ещё один исследователь открыл смесь, так понравившуюся Нёгерату, то тот сразу же подал патентную заявку (которая, возможно, даже и не была бы принята при гораздо более строгих патентных законах в США). Неудивительно, что после этого все вокруг, включая, в частности, и Нёмесата с Нёгератом, стали обвинять друг друга в нарушении собственного патента. В 1946 году, когда Хайнц Мюллер приехал в нашу страну, он встретил Нёгерата снова и обнаружил, что тот всё ещё возмущен, выкрикивая «И БМВ, а, в особенности, Нёмесат, *стационаризируют* кучу наших патентов».

В районе 1942 или 1943 года I.G. Farben сместило внимание с разработки топлива на основе первоначально созданных смесей, похожих на «Тонка» и «Эрго», в направлении серии веществ, основанных на «Визоле» и представлявших собой виниловые эфиры. Данные эфиры обладали быстрой самовоспламеняемостью с MS-10, которая являлась смесью 10 процентов серной и 90 процентов азотной кислот, при этом задержка воспламенения была менее чувствительна к температуре, чем в случае чистой кислоты. Надо сказать, что получение указанного свойства является серьёзной задачей, топливная пара может воспламениться за 50 миллисекунд при комнатной температуре и иметь задержку в целую секунду при -40°C .

Кроме того, практически на веру было принято, что MS-10 не оказывает коррозионного воздействия на нержавеющую сталь. Это нереалистичное предположение держалось почти пять лет, прежде чем оно было опровергнуто.

Типичная смесь, запатентованная доктором Хеллером в 1943 году, состояла из 57,5 процентов Визоля-1 (винилбутилового эфира) или Визоля-6 (винилэтилового эфира), 25,8 процентов Визоля-4 (дивинилового эфира бутандиола), 15 процентов анилина и 1,7 процентов пентакарбонила железа или нафтената железа. Нужно отметить, что Хеллер должен был добавить свой катализатор на основе железа в горючее, а не в окислитель ввиду того, что последний содержал серную кислоту, а сульфат железа нерастворим в азотной кислоте. Было множество вариаций такого рода топлив, винилисобутиловый эфир заменялся время от времени N-бутиловым соединением. В конце концов около 200 смесей было опробовано, и менее 10 были признаны годными к использованию. «Оптолин» был смесью анилина, Визола, ароматических углеводородов, иногда аминов, бензина и пирокатехина, ЗУР Васерфаль использовала горючее Визоль.

Несколько организаций пытались найти добавки, в малых количествах делающие лёгкий или обычный бензин самовоспламеняющимся с кислотой. Вещества типа карбонила железа или селенида натрия более или менее подходили на эту роль, но успех был скорее академическим в силу того, что все эти добавки были или редки, или дороги, или слишком активны для того, чтобы иметь с ними дело.

Но азотная кислота определенно была победителем. Многие немецкие ракеты были первоначально разработаны для перекиси водорода, но по мере развития боевых действий подводные лодки Вальтер Тип IV грозились использовать всё доступное количество. При том работы с азотной кислотой были настолько успешны, что переход на этот окислитель для ракет стал неизбежен. В течение этого периода времени были рассмотрены многие другие комбинации помимо уже используемых и получено теоретическое значение эффективности. Данные вычисления уже не были ранними наивными оценками Зангера и др. и принимали во внимание давление в камере сгорания, давление истечения, термическую эффективность, температуру горения, диссоциацию – всё, что было необходимо. Вычисления такого рода чрезвычайно утомительны, даже одно, выполненное с настольным калькулятором, может легко занять целый день. Но доктор Грит Рейндж и прочие сумел продраťся через них, рассмотрев в качестве горючего спирт, спирто-водяную смесь, бензин, дизельное топливо, аммиак, пропаргиловый спирт и одному только Господу Богу известно, что ещё. Далее, в качестве окислителя были проанализированы кислород, азотная кислота, N_2O_4 , тетранитрометан, озон и OF_2 , хотя и люди в лабораториях не имели достаточного количества последнего для того, чтобы полностью его оценить. И не позднее 1943 года уже был рассмотрен вопрос использования трехфтористого хлора, который до этого представлял собой не более чем лабораторную диковинку. Но так как это вещество уже производилось в промышленных масштабах (предполагалось его использование в качестве зажигательного вещества), также были вычислены и значения его производительности с аммиаком и странными комбинациями вроде суспензии углерода в воде.

Одно из вычислений, произведенное в это время доктором Нёгератом, показало, что в случае замены топлива в А-4 на азотную кислоту и дизельное топливо,

дальность действия ракеты увеличилась бы на величину, достойную принятия во внимание. Причиной было не то, что эта комбинация имела лучшую эффективность, чем у кислорода со спиртом, а большая плотность, приводившая к увеличению заправки баков. Указанное вычисление не оказало особого эффекта в тот момент, хотя А-10, запланированная как наследница А-4, должна была использовать новую топливную пару. Но несколько лет спустя эта история получила замечательное продолжение в Советском Союзе.

Окислителем, всегда бывшем в статусе «мог бы использоваться», был тетранитрометан. Это хороший окислитель с несколькими преимуществами – он является долгохранимым, обладает эффективностью, лучшей чем у азотной кислоты, а также более высокой плотностью, что позволяет заправить больше окислителя в меньший по размерам бак. Но он плавится при $+14,1^{\circ}\text{C}$, поэтому в любое время года кроме приятного летнего дня это вещество остается в твёрдом состоянии. И к тому же оно взрывоопасно, как было обнаружено Эсно-Пелтери, и, как минимум, одна немецкая лаборатория была разрушена по этой причине. Эвтектическая смесь с N_2O_4 , состоящая из 64 процентов ТНМ и 36 процентов N_2O_4 , не замерзает вплоть до температуры -30°C , является существенно менее чувствительной, чем чистый ТНМ, но по-прежнему рассматривается как опасная в использовании, и Нёгерат категорически отказался от каких-либо работ с этим веществом и даже не допустил его в свою лабораторию. Но инженеры продолжали засматриваться на этот окислитель с тайной тоской, и когда ими был получен (к слову сказать, совершенно неверный) отчет разведки о массовом использовании этого вещества в Соединенных Штатах, немцы героически начали процесс синтеза и собрали 8-10 тонн ТНМ к концу войны. И никто не нашел способа его использования.

Ещё одна идея, так ни к чему и не приведшая, состояла в гетерогенном горючем – суспензии, или взвеси, измельченного металла типа алюминия в жидком топливе (например, в бензине). Этот подход был предложен несколькими авторами, включая Цандера в СССР, Зангера в Австрии, и Хайнц Мюллер из БМВ опробовал идею, используя измельченный алюминий или магний в дизельном топливе. Эффективность смеси была очень плохой, давление в камере составляло от 3,4 до 6,8 атмосфер вместо традиционных 20 ввиду неполного сгорания металла. Но остальные результаты были впечатляющими. Двигатель был запущен в горизонтальном положении напротив наклонной стены, отражавшей выхлоп вверх. Но несгоревшие частицы оседали вниз и создали замечательное, сияющее, серебристое покрытие для всех елей в округе, отлично подходящее для Рождества. Идея взвеси возникла снова двадцать лет спустя, сведя с ума ещё одно поколение экспериментаторов.

Экспериментальные работы с монотопливом (названными «Монерголами») продолжались до конца войны. В 1937-1938 годах большие усилия были приложены к раствору N_2O или NH_4NO_3 в аммиаке, вторая смесь была много лет известна как раствор Драйвера. Единственным результатом данных экспериментов была разочаровывающая серия взрывов и разрушений двигателей. Также в Пенемюнде доктор Вармке попытался растворить спирт в 80-процентной H_2O_2 и запустить на *этом* двигатель, который сдетонировал и убил его. Тем не менее, фирма Вильгельма Шмидинга продолжила экспериментировать с монотопливом, названным «Мирол», и представлявшим собой смесь 80-20 метилнитрата и ме-

танола – очень близкую к нитроглицериново-метаноловой смеси, опробованной Крокко за несколько лет до этого. Им удалось прожечь это вещество и получить эффективность, достойную уважения, но взрыв за взрывом преследовал их как проклятие, и надёжные результаты так и не были получены.

Кроме того, была создана топливная пара, названная работниками БМВ и ARIB «Литерголсом», напомнившая о первоначальном двигателе, опробованном Обертом во время его взаимоотношений с UFA. Перекись водорода или закись азота N_2O была впрыснута в двигатель, в котором было закреплено несколько пористых углеродных стержней. Закись азота может экзотермически разлагаться на кислород и азот, подобно перекиси, выдающей кислород и пар, и таким образом действовать как монотопливо. Но экспериментаторы хотели получить больше энергии за счет сгорания углерода в образующемся кислороде. Когда в конце войны они сдались в плен американцам, то уверили своих захватчиков, что осталось проделать небольшую инженерную работу для доведения всей системы до рабочего состояния. На самом деле, прошло почти двадцать лет, прежде чем хоть кому-то удалось заставить гибрид действовать.

В тоже время, давайте вернемся к нашим баранам.

Самая поразительная вещь, относящаяся к топливным исследованиям в Соединенных Штатах в течение военных лет, состоит в удивительной близости параллельных с Германией разработок. В самом деле, не было американской ракеты А-4, также как и высококонцентрированной перекиси водорода, но другие исследования в этой области были чрезвычайно схожи.

Как уже было отмечено в первой главе, первой задачей GALCIT для вооруженных сил было создание ракетного стартового ускорителя для того, чтобы помочь Воздушному Корпусу Армии США оторвать свои бомбардировщики от земли. И Воздушный Корпус потребовал долгохранимый окислитель, ибо военные совершенно не собирались играть в глупые игры с жидким кислородом.

Так что всё дело нужно было начинать с выбора окислителя. Кислород и озон, оба не будучи долгохранимыми, очевидным образом не годились на эту роль. Хлор обладал недостаточной энергетикой, и Малина, Парсонс и Форман, сделавшие с помощью доктора Муди обзор данной темы, решили, что N_2O_4 является неподходящим для практического использования. Сложно сказать, почему был сделан такой вывод, но возможно, что он был вызван чрезвычайной токсичностью этого вещества. Ими была рассмотрена 76-процентная хлорная кислота, тетранитрометан и, наконец, выбор был остановлен на красной дымящей азотной кислоте, или КДАК, содержащей 6 или 7 процентов N_2O_4 . Для этой кислоты были подвергнуты суровому испытанию различные горючие жидкости такие как бензин, нефтяной эфир, керосин, метиловый и этиловый спирт, скипидар, льняное масло, лёгкий бензин и т.д., и было обнаружено, что указанная кислота поддерживает горение. Далее, было выяснено, что гидрат гидразина и лёгкий бензин являются самовоспламеняющимися, хотя исследователи и не слышали о термине «гиперголический» в отношении данной кислоты. В окончательном отчете (Исследование реактивной тяги для Воздушного Корпуса, GALCIT – отчет ЛРД №3, 1940, к этому моменту группа Малины стала называться Лабораторией Реактивного Движения, и возглавлялась фон Карманом), выпущенном в 1939-1940 году, было высказано крайне преждевременное утверждение:

«Единственным возможным источником осложнений в отношении этой кислоты является её коррозионная активность, которая может быть преодолена путём применения материалов, устойчивых к данному воздействию». Но если бы авторы только знали о проблемах, вызванных азотной кислотой, они бы точно сбежали из лаборатории и прострелили себе голову.

Но как бы то ни было, этот отчет был замечательным обзором в своей области на тот момент времени и содержал сложные и аккуратные вычисления значений эффективности. Метод был разработан в докторской диссертации Малины в 1940 году и был совершенно таким же, как и разработанный в Германии. Один из первых сборников термодинамических свойств истекающих газов был опубликован Дж.О. Хиршфелдером в ноябре 1942 года, также как и необходимые для указанных вычислений входные данные.

Малина и Ко начали экспериментальную работу с КДАК и бензином уже в 1941 году и сразу же столкнулись с проблемами. Это чрезвычайно сложная в обращении смесь, замечательно подходящая для доведения любого экспериментатора до белого каления. Прежде всего, у неё практически невозможно инициировать горение, ЛРД использовала свечу зажигания и чаще получала взрыв, чем гладкое инициирование процесса, к которому стремилась. И когда удавалось добиться зажигания, двигатель начинал кашлять, пыхтеть, орать и икать и потом обычно взрываться. Металлический натрий, разведенный в горючем, отчасти помогал в зажигании, и лёгкий бензин был слегка лучше бензина обыкновенного, но не слишком сильно и явно недостаточно. Понадобилось случайное открытие, сделанное в другой части страны, позволившее сразу же решить проблему.

Для этого необходимо вернуться в прошлое. С 1936 по 1939 годы, Роберт С. Труа, бывший тогда курсантом в академии ВМФ США, в личное время экспериментировал с жидкотопливными ракетами, сделанными из подручных материалов. Закончив учебу, отслужив положенные два года на морской службе и получив в 1941 году звание капитана-лейтенанта, он был откомандирован в распоряжение Аннаполисской Экспериментальной Станции с приказом о разработке стартового ракетного ускорителя. Для ВМФ стояла проблема взлета с поверхности обладавших недостаточной мощностью и перегруженных бомбардировщиков RBM и RBV. Роберт также столкнулся с сложностями в процессе зажигания и горения, но член его небольшой команды Энсин Стиф в процессе работы на газовых генераторах (небольшими устройствами, вырабатывающими при горении раскалённый газ под давлением) обнаружил, что анилин и КДАК автоматически воспламеняются при контакте. Нужно сказать, что такие открытия обычно являются неожиданными, если не сказать приводящими в замешательство, и кто-то вопрошал, удалось ли Энсину Стифу сохранить свои брови в нетронутом виде.

Как бы то ни было, Фрэнк Малина посетил Аннаполисскую Экспериментальную Станцию в феврале 1942 года, узнал об этом открытии и тут же позвонил в ЛРД в Пасадене, и сразу же после этого ЛРД переключилась с бензина на анилин. И все сложности волшебным образом улетучились, самовоспламенение стало мгновенным, а горение гладким. Двигатель с тягой в 450 килограмм испытали первого апреля (тогдашние люди были профессионалами в своем деле), и уже пятнадцатого средний бомбардировщик А-20 был запущен в воздух — что было первыми полетом стартового ракетного ускорителя в Соединенных Штатах.

Труа, конечно же, применил эту топливную комбинацию и в начале 1943 года подвесил на РВУ два ускорителя тягой по 680 килограмм, которые помогли оторвать значительно перегруженный Дамбо от воды.

Другие люди также работали над ракетными ускорителями для ВМФ, включая самого профессора Годдарда, чьё устройство было удачно запущено в составе РВУ в сентябре 1942 года и ставшее первыми ракетным ускорителем для флота. Годдард использовал свою классическую комбинацию жидкого кислорода и бензина, Reaction Motors же, также проявлявшие активность в этой области, пришли к совершенно замечательной модификации.

Компания Reaction Motors, Inc., обычно называемая RMI, была основана в 1941 году горсткой ветеранов Американского Ракетного Общества, включавшей Джейса Вилда, Ловелла Лоуренса и Джона Шеста, и обязалась построить ракетный ускоритель. Сначала они использовали жидкий кислород (так как вся работа АРО выполнялась с этим окислителем) и бензином. Но было обнаружено, что данная топливная пара дает слишком высокую температуру горения и вызывает прогар двигателей. Поэтому при поступлении бензина в камеру сгорания, он смешивался с водой через дозирующий клапан. Сгорание стало более гладким, и двигатель оставался невредимым. Это было слегка менее элегантно решение проблемы температуры горения, чем использованное VfR (и Пенемюнде), состоявшее в смешивании воды со спиртовым горючим. Устройство RMI было успешно испытано с РВМ в 1943 году. Во время испытаний, проходивших на реке Северн, реактивный выхлоп поджег хвост гидроплана, но лётчик-испытатель нашел (или утопил) возможность посадить самолет хвостом на воду на манер комедийных актёров с горящими фалдами, в старых фильмах быстро садившихся в корыто, заполненное водой, с соответствующим шипящим звуком и тучей пара.

Комбинация анилин-КДАК обладала единственным, но при этом значительным преимуществом – она работала. Во всех же остальных отношениях это была редкостная гадость. Во-первых, анилин было гораздо сложнее заполучить, чем бензин, особенно в середине войны форменных рубашек, когда все вокруг хотели его использовать для изготовления взрывчатки и проч. Во-вторых, анилин чрезвычайно токсичен и быстро проникает через кожные покровы. И, в-третьих, он замерзает при $-6,2^{\circ}\text{C}$, и, таким образом, является горючим, подходящим только для теплой погоды. И армия, и флот, представляя в этом случае редкий пример единодушия, даже и думать не хотели об его эксплуатации. Но у них не было выбора.

Две тесно переплетающиеся линии исследований служили в качестве отличительного признака последнего периода войны. Одна состояла в снижении точки замерзания анилина, вторая была посвящена поиску метода самовоспламенения бензина с азотной кислотой. Компания American Cyanamid получила заказ на исследование добавок, создающих второй эффект, и ЛРД работала по обе стороны улицы, а также экспериментировала с кислотой, изменяя состав смеси. Кроме обычной КДАК, содержащей 6 процентов N_2O_4 , проводились испытания с 13 процентами, а также со смешанными кислотами, похожими на то, что проверяли немцы, но несколько более мощными. Одна из испытанных комбинаций содержала 88 процентов азотной кислоты, 9,6 серной и 2,4 процента SO_3 (это очень близко к смесям кислот, используемых при производстве взрывчатки). И испыта-

тели также верили, что нержавеющая сталь не будет в этом случае подвержена коррозии.

Очевидным способом снижения точки замерзания анилина служило смешивание его с чем-нибудь ещё, предпочтительно таким же самовоспламеняющимся, как и анилин. И не менее очевидным путем добавления свойства самовоспламеняемости к бензину было смешивание его с чем-то такого же рода. Оба линии исследования были восприняты с энтузиазмом.

В ЛРД анилин был смешан с орто-толуидином, являющимся близким производным, и получена эвтектика с точкой замерзания -32°C . Но о-толуидин был также страшен, как и сам анилин, и хотя данная смесь была успешно прожжена, она так и не была доведена до стадии практической эксплуатации. Более удобной добавкой был фуриловый спирт, бывший любимчиком Зборовски. Этот спирт получают из дубовой коры, компания Quaker Oats имела автоцистерны с данным продуктом и была просто счастлива продать его кому угодно, кто был бы готов избавить их от этой обузы. 20 процентов фурилового спирта в анилине снизила точку замерзания до 0°F , или $-17,8^{\circ}\text{C}$, а эвтектическая смесь из 51 процента анилина и 49 процентов фурилового спирта имела температура замерзания -42°C . И, наконец, фуриловый спирт является самовоспламеняющимся подобно анилину.

Что же касается бензина, то ЛРД добавила анилин, дифениламин, смешанные ксилидины и другие вещества, родственные анилину. Кроме того, были опробованы смешанные алифатические амины и ещё всё, о чём только можно было и подумать, а потом замерено время воспламенения. Но так и не удалось обнаружить добавку, которая бы при малом процентном соотношении могла сделать бензин быстро самовоспламеняющимся с КДАК или смешанной кислотой. Одной из лучших добавок была смесь ксилидинов, но требовалось около 50 процентов этого вещества для получения надежной и быстрой самовоспламеняемости и, в итоге, оно становилось не добавкой, а основным компонентом. И к ещё большему разочарованию, в Соединенных Штатах не существовало промышленного производства ксилидинов, и хотя Аэроджет рассматривала похожую смесь за несколько лет до этого в 1949 году, никаких конкретных решений так и не было предпринято.

Компания American Cyanamid получила примерно такие же результаты. Они начали с топливного мазута, дизельного топлива и бензина и добавили в указанные горючие анилин, диметиланилин, моно- и диэтиланилин, необработанный моноэтиланилин и скипидар. Большинство экспериментов было проведено с смешанными кислотами, несколько с КДАК и некоторые с чистой 98-процентной азотной кислотой (белая дымящая азотная кислота, или БДАК). И не в одном случае не было найдено подходящей добавки, хотя и было обнаружено, что скипидар замечательным образом самовоспламеняется с смешанными кислотами или КДАК и сам по себе мог бы быть хорошим горючим. И задумайтесь о всех этих голосах «за» из сосновых лесов Юга!

Компания Aerojet Engineering была основана в марте 1942 года, выступая по существу в роли сборочного подразделения ЛРД. Основателями были фон Карман, Малина, Парсонс, Саммерфилд и Форман, все бывшие членами ЛРД, а также Эндрю Хэйли, работавший доверенным лицом фон Кармана. И ими была начата собственная исследовательская программа в области топлива, хотя в течение нескольких лет её было сложно освободить от пут ЛРД.

Аэроджет была первой организацией, интенсивно работавшей с необработанным N-этиланилином, иногда называемым моноэтиланилин, в качестве горючего. Это вещество самовоспламенялось также быстро как и сам анилин. Необработанный и коммерческий продукт содержал около 10 процентов диэтиланилина и 26 процентов самого анилина, оставшаяся часть состояла из моноэтилового соединения, при этом температура замерзания была -63°C . В целом, это было элегантное решение проблемы точки замерзания, но токсичность была на том же уровне, что и у предшественника, как и проблемы с получением.

Но с этим уже можно было иметь дело. Топливной парой для стартового ракетного ускорителя Аэроджет, развернутого в производстве в конце войны, были смешанная кислота и моноэтиланилин, так же как и для двигателя RMI для ракеты ВМФ поверхность-воздух Lark, чья разработка началась в 1944 году. Ракета земля-земля Капрал, запущенная в том же году, была разработана для топливной пары КДАК и анилин-фуриловый спирт.

Три организации работали над монотопливами во время войны, хотя и с ограниченными усилиями, и всё сконцентрировались на нитрометане. ЛРД начала работу первой в 1944 году или ранее и обнаружила, что горение может быть улучшено путем добавления небольшого количества триоксида хрома (позднее ацетилацетоната хрома) к горючему. Компания Аэроджет также работала с этим веществом и установила, что было необходимо уменьшить чувствительность путем добавления 8 процентов бутилового спирта. Затем Боб Труа из Аннаполисской Экспериментальной Станции попробовал поработать своими собственными руками и был близок к гибели, когда кто-то присоединил неправильную трубку к правильному клапану, что привело к взрыву бака. И, в конце концов, Дейв Алтман из ЛРД опробовал смесь бензина и тетранитрометана, которая, что было вполне естественно, сдетонировала.

И тут война закончилась, немецкая работа была выставлена на белый свет, и всё начало становиться на самом деле запутанным.

Глава 3

В погоне за Гиперголом...

По мере продвижения американских следователей по территории Германии сразу вслед за армией (а иногда и впереди её) было обнаружено, что немецкие ракетчики более чем готовы к сдаче в плен (и устройству на новую работу) и горят желанием рассказать всё, что им было известно. Американцы не только заполучили ведущих учёных, но и захватили всё, что не было приколочено к полу, включая полный архив Пенемюнде (который команда фон Брауна благоразумно разместила в заброшенном руднике), а также все ракеты А-4 как полностью, так и частично собранные. Энергичные американцы, будучи грабителями по духу, забрали каждый миллиграмм гидрата гидразина и высококонцентрированной перекиси водорода, что можно было найти в Германии. Ну и само собой, были построены специальные алюминиевые автоцистерны для перевозки последнего. В итоге всё это было соответствующим образом доставлено в Соединенные Штаты.

Эти шаги были очевидны, проблема состояла в том, что делать дальше.

Комбинация спирта и кислорода казалась вполне подходящей для ракет дальнего действия, но Соединенные Штаты не имели конкретных планов по постройке такого рода изделий. Тонки и Визолы не имели преимуществ перед моноэтиланилином или смесью анилина и фурилового спирта, разработанных в США, как и не было ничего нового в отношении азотной кислоты, также американцы полагали, подобно немцам до этого, что им известно всё об этом веществе. Как известно, необоснованная эйфория и преждевременная уверенность являются международным феноменом.

Они не сомневались, что как управляемые, так и баллистические ракеты были артиллерией будущего. Единственный (или один из многих) вопрос состоял в нахождении оптимальной топливной пары для данной или проектируемой ракеты. Так что даже люди, имевшее отдаленное отношение к указанной теме, производили собственное изучение всех возможных горючих и окислителей и пытались решить, что же должно быть выбрано. Леммон из ЛРД представил ВМФ результаты всестороннего обзора весной 1945 года, и еще полдюжины отчетов из North American Aviation, Reaction Motors, Rand Corporation, M.W. Kellogg Co. и прочих появились в течение нескольких последующих лет. Каждый отчет перечислял свойства всех существующих или планируемых горючих, которые только могло придти в голову составителя, и содержал результаты дюжины утомительных вычислений значений эффективности. К удивлению людей, не бывших подкованных

в области химии, все пришли к практически одинаковым выводам.

Данные выводы можно собрать в две группы. Первая относится к ракетам дальнего действия или же к ракетам, предназначенным для запуска спутника (уже в 1946 году как ВВС, так и ВМФ проводили серьезные изучения задачи отправки на орбиту искусственного спутника Земли). Для приложений такого рода криогеника (вещества, которые не сжижаются никаким образом, кроме как путём охлаждения до очень низкой температуры) может быть использована, и все согласились, что:

1. Оптимальным окислителем является кислород («Фтор может быть подходящим, но его плотность слишком низка и с ним чертовски сложно иметь дело.»)
2. С точки зрения эффективности жидкий водород наилучшее горючее, но с ним чрезвычайно трудно обращаться, и по ходу дела его плотность настолько низка, что необходимый размер баков будет огромным. Всё, что находится ниже водорода относительно первого из указанных параметров, не имеет особых отличий. Спирт, бензин, керосин – все они работают довольно хорошо и с ними можно иметь дело. («Но может быть, кто-то смог бы опробовать штуки типа диборана или пентаборана?» Значение эффективности, будучи вычисленным, выглядит чрезвычайно привлекательно. «Конечно, эти вещества редки, дороги и впридачу ядовиты, но ...?»)

Вторая группа выводов (или их отсутствия) касалась вещей вроде ракетных стартовых ускорителей и тактических ракет ближнего радиуса действия, которые должны были использовать долгохранимые компоненты. И полученные выводы были гораздо менее определенными:

1. Доступными окислителями были азотная кислота, перекись водорода (по мере разворачивания его промышленного производства в США) и тетраоксид азота. Но оба N_2O_4 и 90-процентная перекись водорода замерзают при $-11^\circ C$, и что если военные действия будут происходить, к примеру, в феврале в Сибири или в стратосфере? И поэтому азотная кислота в одном из её вариантов казалась наиболее вероятным кандидатом («Конечно же, если температура замерзания остальных двух может быть как-то снижена... И что можно сказать о странных вещах типа ClF_3 ?»)
2. Итоговые выводы были гораздо менее ясны при рассмотрении долгохранимого горючего. За несколькими исключениями, никто из кандидатов не имел значительного преимущества в плане эффективности. Поэтому окончательные решения должны были быть приняты базируясь на вторичных свойствах: доступность, самовоспламеняемость, гладкость горения, токсичность и т.п. Но было одно важное исключение в виде гидразина (не гидрата гидразина, использовавшийся немцами, а безводного N_2H_4). Дейв Хорвитц из RMI прожег гидрат с кислородом в 1950 году, но я не уверен в проведение каких-либо ещё экспериментов по крайней мере в нашей стране с использованием этого соединения. Почти весь гидрат гидразина, заполученный у

немцев, был преобразован в безводное основание перед тем, как был разослан для тестирования. Одним из методов конверсии был пропуск гидрата через оксид бария и затем дистилляция безводного гидразина при пониженном давлении. Гидразин самовосламенялся с планируемыми окислителями, имел высокую (1,004) плотность как горючее, и его эффективность была определенно выше, чем у других рассматриваемых горючих. Но температура замерзания данного соединения составляла $1,5^{\circ}\text{C}$ и была выше, чем у воды! И стоил гидразин почти сорок пять долларов за килограмм. Так что очевидным образом нужно было сделать две вещи – уменьшить цену гидразина и каким-то образом снизить его температуру замерзания (и при этом опять возникала призрачная мысль о пентаборане).

Было одно обстоятельство, с которым все были согласны. Никто не собирался иметь дело с парой анилин-КДАК не единой лишней секунды более, чем это было совершенно необходимо. Кислота была настолько коррозионной по отношению ко всем материалам, подходящим для изготовления баков, что должна была заливаться в ракету прямо перед стартом, действие, означавшее обращение с ней при непосредственной эксплуатации. И в процессе заправки при испарении возникало плотное облако чрезвычайно токсичного NO_2 , а жидкость сама по себе вызывала опасные и чрезвычайно болезненные ожоги при соприкосновении с человеческой кожей. И... но азотная кислота и борьба за её укрощение заслуживает и получит свою отдельную главу в этой книге.

Анилин почти так же ужасен, но при этом слегка более изыскан. Если человек попадает в зону его действия и не будет немедленно эвакуирован, то обычно он становится пурпурным, затем синим и с высокой вероятностью умирает от цианоза в течение нескольких минут. Так что данная топливная пара по вполне понятной причине была непопулярна, и был сделан запрос для чего-нибудь нового, что по крайней мере не было бы настолько ядовитым и неудобным в обращении.

Каплан и Борден из ЛРД сделали новое предложение в начале 1946 года в виде БДАК и чистого фурилового спирта. Фуриловый спирт был примерно в той же степени безопасен как и, вероятно, остальные горючие, и БДАК, будучи столь же коррозионной и опасной для человека, как и КДАК, по крайней мере не выбрасывала облака NO_2 . Топливная пара была прожжена ими в двигателе WAC Капрал и в сравнении со смесью 20 процентов фурилового спирта и 80 процентов анилина с КДАК не было найдено никакой особой разницы в показателях эффективности между двумя системами (ракета WAC Капрал была задумана в качестве метеорологической «младшей сестры» ракеты «Капрал» с тягой в 9 тонн и стала прародителем «Аегобее»). И в качестве бонуса исследователи обнаружили, что зажигание было быстрым и гладким, а также гораздо более устойчивым по отношению к воде, содержащейся в кислоте, по сравнению с топливной парой «Капрала».

Примерно в то же самое время RMI провела похожую серию тестов с двигателем ракеты Ларк тягой в 100 килограмм, работавшем на стандартной топливной паре, состоявшей из смешанной кислоты и моноэтиланилина. Были использованы три вида горючего – 80-октановый бензин, фуриловый спирт и скипидар, а также три типа окислителя – смешанная кислота, БДАК и КДАК с содержанием N_2O_4

в 15%.¹ Для поджигания бензина применили самовосламеняющий иницирующий стержень и, к довольно большому удивлению, получили хорошие результаты со всеми тремя кислотами. Фуриловый спирт работал недостаточно хорошо с смешанной кислотой, эта пара была дымной и грязной, кроме того, реакция серной кислоты, входившей в состав смешанной, производила со спиртом странный набор смол, нагара и отложений, забивавших двигатель. Но фуриловый спирт отлично работал с КДАК и БДАК, загораясь значительно мягче, чем стандартное на тот момент топливо. Скипидар же имел жесткий запуск с красной и белой дымящей азотной кислотами, но со смешанной загорался подобно струе из пожарного шланга. В итоге эта топливная пара стала одной из выбранных двух, где вторая комбинация состояла из фурилового спирта и БДАК (КДАК имела чуть лучшую эффективность – но эти пары N_2O_4 !), хотя очищенный фуриловый спирт замерзает при $-31^\circ C$, что слишком высоко для удобства обращения.

Множество других топлив было опробовано в конце сороковых и начале пятидесятых. Смеси ЛРД, состоявшие из анилина и этанола или изопропанола были исследованы и испытаны с КДАК. Там же ещё в 1949 году был прожжен аммиак с КДАК, и на следующий год Койл и Фостер протестировали его с N_2O_4 . M.W. Kellogg Co испытала аммиак с БДАК, и к 1951 году R.J. Thompson из этой компании громко бил в барабан, извещая всех о данной топливной паре как подходящей на все случаи жизни. Reaction Motors экспериментировали со смесями аммиака и метиламина (для уменьшения давления паров первого) и показали, что добавление 1,5 процента декаборана делает аммиак самовосламеняющимся с БДАК, в то время как в 1953 году Bendix Corp. продемонстрировала, что такой же эффект может быть получен путем пропуска аммиака через литиевый стержень прямо перед форсункой.

ЛРД испытала с КДАК такие странные вещества, как фурфурол и два метилированных и частично восстановленных пиридина, тетрапир и пентаприм. Цель этих тестов не является совершенно очевидной, также как и причина, по которой RMI занималась циклооктатетразном с БДАК. Это горючее не только дорого и сложно в получении, но также имеет очень высокую температуру замерзания и не обладает никакими особыми свойствами, чтобы быть рекомендованным к использованию. Причина, по которой Ракетная Тестовая Станция Морской Авиации начала испытания оксида этилена с БДАК со всеми сопутствующими сложностями, столь же загадочна. Нужно отметить, что подход Эдиссона в данном случае заслуживает внимания, но слишком уж многое может пойти совершенно непредсказуемым образом. Одна из самых странных комбинаций была опробована RMI, прожегшей d-лимонен с БДАК. d-лимонен является терпеном, который можно извлечь из кожуры цитрусовых фруктов, и вся округа в испытательной зоне была накрыта замечательным ароматом лимонного масла. Контраст по сравнению с запахами большинства других ракетных топлив делает этот факт ещё более стоящим упоминания.

Много времени заняло осознание в итоге очевидного для всех факта, что прожигание топливной пары в двигателе не является идеальным методом выяснения свойства самовосламеняемости и, в случае его наличия, высокой скорости

¹Что интересно, так это факт применения на первой ступени ракеты Диаманд, впервые запустившей французский спутник, скипидара и КДАК

инициации. В силу самой природы исследования больше тестов проваливается, чем успешно заканчивается, и больше топливных комбинаций воспламеняются медленно, чем мгновенно вспыхивают. И когда результатом задержки зажигания становится разрушенный двигатель, исследовательская программа слегка затягивается и отнюдь не слегка дорожает. Так что первоначальная оценка переместилась из тестового стенда в лабораторию, кроме того, различные агентства построили для себя того или иного рода аппаратуру для измерения задержки зажигания. Большинство этих устройств были созданы с таким прицелом, что не только фиксировался факт самовоспламенения, но также и измерялась задержка зажигания в том случае, если она имела место. С точки зрения конкретной конструкции все они значительно отличались, будучи на практике ограничены только лишь фантазией исследователя. Простейшее устройство для проверки содержало пипетку, маленькую мензурку и отлично откалиброванное глазное яблоко, в самом продвинутом случае это был практически небольшой ракетный двигатель в сборе, ну и, конечно же, имело место всё что угодно между этими двумя вариантами. Один из самых замечательных примеров оборудования был задуман моим непосредственным руководителем Полем Терлизи в NARTS. Он хотел снять по Шлирен-методу (с затемнением) высокоскоростные кадры процесса инициирования зажигания (мне было неизвестно и тогда, и в настоящее время, какую информацию они задумали получить).² Имелась небольшая камера сгорания с высокоскоростными клапанами и форсунками для исследуемого горючего. Приемники изображения, высокоскоростная камера Fastex и порядка двадцати килограмм линз, призм и много чего ещё, в большинстве своем извлеченных из захваченных немецких перископов для подводных лодок, были окончательно собраны, и доктор Милтон Шеер (Дядя Милти) потратил недели труда, регулируя и фокусируя оптику.

И вот настал день первого испытания, топливом служили гидразин и БДАК. Мы все собрались вместе для того, чтобы наблюдать запуск воздушного шара, когда Дядя Милти взволновался – «Погодите, клапан кислоты протекает!»

«Поехали – запускай в любом случае» – приказал Пол.

Я огляделся, дал знак своей банде, и мы начали аккуратно отходить подобно тому как это делают многие коты с мокрыми лапами. Говард Стрейм собрался было уже открыть рот и запротестовать, но как он позже рассказывал – «Я увидел ухмылку Дока, похожую на собачью во время еды, и решил попридержать рот», после чего кто-то нажал кнопку. Последовали небольшой выброс желтого пламени, а затем сверкающая ярко-белая вспышка и оглушительный треск. Крышка камеры сгорания вылетела через потолок (мы нашли её на чердаке пару недель спустя), приёмники изображения просто исчезли, и не успел я моргнуть и глазом, как почти двадцать килограммов высококачественного оптического стекла превратились в мелкий порошок.

Зажав рот обеими руками и выскочив из лаборатории, я свалился на газон в приступе хохота, Пол появился следом в гневе. Когда я едва приковылял обратно в лабораторию несколько часов спустя, то обнаружил что мои разбойники уже выпилили, вынесли и аккуратно уложили чуть больше метра поверхности стола,

²Будучи неистребимым изобретателем сокращений, он назвал данный процесс «STIDA» в честь Schlieren Type Ignition Delay Apparatus (устройство по типу Шлирена для измерения задержки воспламенения).

на которой покоилось устройство, так что STIDA Пола ни за что и никогда не собиралась в *нашей* лаборатории.

Другие организации столкнулись со своими проблемами устройств для замера задержки зажигания, хотя их опыт и не был столь впечатляющим, как наш, но в конце концов они стали получать результаты на выходе. Не было слишком удивительным, что разные лаборатории выдавали отличные от других значения, и с 1945 по 1955 годы было бы сложно найти промежуток времени, когда бы не проводились совместные программы по измерению задержки зажигания, в то время как различные лаборатории пытались согласовать свои результаты. Одной из сложностей было то, что разные проверяющие устройства сильно отличались в скорости и эффективности, с которой они смешивали два реагента. И ещё одна проблема заключалась в том факте, что различные критерии для фиксирования зажигания использовались в ходе разнообразных экспериментов. В одном случае этим могло быть появление пламени (зафиксированное фотокамерой, датчиком ионизации или высокоскоростной камерой) в момент реакции, в то время как в другом (в конфигурации с микродвигателем) мог фиксироваться момент, в который двигатель выходил на режим полной тяги или предусмотренного давления в камере.

Но хотя различные исследования не часто приводили к одинаковым значениям, в общем случае они располагали топливные пары в одинаковом порядке. В то время как редко приходили к соглашению по поводу точного числа миллисекунд, затраченных комбинацией А для загорания, в целом получали окончательное мнение, что эта комбинация была дьявольски быстрее комбинации Б.

Этого было достаточно для многих задач, ведь, в конце концов, все знали что БДАК и фуриловый спирт были достаточно быстры, чтобы иметь с ними дело, и, очевидно, если что-то показало в проверяющем устройстве скорость выше чем у указанной пары, оно, возможно, стоило того, чтобы опробовать его в двигателе.

Многие лаборатории работали в этой области, но Дон Гриффин в ЛРД и Луи Рапп в RMI были одними из первых, начавших работать с задержкой зажигания. Первая организация, что было вполне естественно в силу создания ей ракеты Капрал, произвела много работы над смесью анилина и фурилового спирта и в 1948 году определила, что смесь с минимальной задержкой зажигания состоит из 60 процентов спирта и 40% анилина. Это было близко к 49ФА, 51-процентной анилиновой эвтектике (с точкой плавления -43°C), и топливо Капрала (ракета сама по себе еще была в разработке) сменили с 20 процентов ФА-смеси на сочетание 50-50.

Кроме того, они подтвердили реакцию самовоспламенения фурановых соединений и ароматических аминов с азотной кислотой и продемонстрировали преимущества N_2O_4 во втором случае. И также ими было показано, что амины, а в особенности третичные амины, и ненасыщенные соединения в общем случае были самовоспламеняемыми, в то время как алифатические спирты и насыщенные соединения не обладали этим свойством. Большая часть работы была произведена с азотной кислотой, но серьезная её часть начиная с 1948 года выполнялась с N_2O_4 , чьи свойства самовоспламеняемости напоминали таковые у кислоты.

Компания Reaction Motors исследовала самовоспламеняемость у похожих соединений так же, как и у такого рода вещей как фураны, виниловые и аллиловые

амины, и, кроме того, у полиацетиленов типа ди-пропаргила со структурной формулой (без водорода) $C\equiv C-C-C-C\equiv C$. И ими было обнаружено, что многие силаны самовоспламенялись с кислотой. Университет Техаса в 1948 году также работал с этими веществами и показал, что 30 процентов тетраллилсилана способны сделать бензин самовоспламеняемым, кроме того, они исследовали цинковые алкилы подобно Зангеру за шестнадцать лет до этого.

Standard Oil of California стала первой нефтяной компанией, развернувшей широкий фронт исследований ракетных топлив, когда Майк Пино из исследовательского подразделения California Research начал измерять задержки зажигания осенью 1948 года.

Вначале их работы напоминала всё то, что делали другие, и были продемонстрированы быстрые воспламенения для диенов, ацетиленов и аллиловых аминов (несколько лет спустя в 1954 году Луи Рапп из RMI собрал результаты всех ранних работ в области задержки зажигания и попытался сделать некоторое обобщение. Основной его вывод состоял в том, что инициирование углеводорода или спирта включает в себя реакцию кислоты с двойной или тройной связью, и если последняя не наличествует, то она должна быть создана перед началом зажигания. Позднее правдоподобность это постулата была исследована в отношении азотной кислоты).

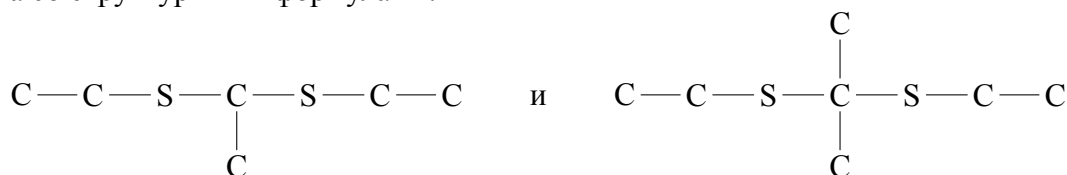
Но потом Пино сделал в 1949 году открытие, которое вполне может быть описано как революционное, и обнаружил, что бутилмеркаптан очень быстро воспламенялся с азотной кислотой. Это естественным образом воодушевило Standard of California, чья сырая нефть содержала большие количества меркаптана и серы, которые должны были удаляться для того, чтобы их бензин годился для широкого использования. Так что у них было большое количество ёмкостей со смешанным бутиловый меркаптаном и никакой возможности его использовать. И если бы только было возможно продать его для ракетного топлива, то жизнь в самом деле заиграла бы всеми цветами радуги.

Итак, данное соединение обладало двумя достоинствами – или даже может быть тремя. Оно самовоспламенялось со смешанной кислотой и имело довольно высокую для топлива плотность, а также не было коррозионным. Но его эффективность была ниже чем у обычных углеводородов – и его запах!!! Ну, честно говоря, запах достоин особого упоминания. Сильный, распространяющийся и проникающий во все щели, он, напоминая вонь рассерженного скунса, значительно превосходил лучшие усилия наиболее энергичных представителей вида *Mephitis mephitis*. Этот запах также пропитывал одежду и кожу, но ракетчики были сделаны из твёрдого теста, и данное соединение было надлежащим и удачным образом испытано, хотя и ходили слухи, что некоторым ракетным механикам было воспрещено совместно пользоваться машинами, и им приходилось бежать позади их. Десять лет спустя эта субстанция была прожжена на Ракетной Тестовой Станции Авиации Флота (Naval Air Rocket Test Station — NARTS), и вонь все ещё чувствовалась в районе испытаний. (И я, руководствуясь более усердием, чем рассудком, действительно проводил в NARTS анализ полученных результатов)

У California Research была замечательнейшая лаборатория в Ричмонде в районе залива Сан-Франциско, и именно там Пино начал свои исследования. Но когда им была инициирована работа с меркаптанами, он и его соучастники были

выпровождены в деревянную хибару в захолустье на расстоянии как минимум в две сотни метров от основного здания. Не будучи напуганным и упорствуя, он продолжал свои зловонные дела, но стоит особого замечания тот факт, что их акценты внимания сместились. Следующими кандидатами были не сопутствующие нефтяные продукты и не коммерчески доступные химикаты, а специально синтезированные этой командой горючие. С этого момента в самом начале 50-ых химии начали брать начало над инженерами, синтезируя под заказ новые топлива (которые часто были совершенно новыми веществами) вместо того, чтобы иметь дело с готовыми субстанциями.

Так или иначе, он пришел к этиловому меркапталу уксусного альдегида и ацетона со структурными формулами:



соответственно. Пахли эти вещества уже скорее чесноком, а не воняли скунсом, воплощая и концентрируя дух чёрных входов всех плохих греческих ресторанов со всего мира. И, в конце концов, Пино превзошел сам себя с некой субстанцией, что имела диметиламиновую группу, присоединенную с сернистому меркаптану, и чей запах никак не может быть описан даже с привлечением всех возможных средств языка. И, наконец, на него слетались мухи. Это было слишком даже для Пино и его неисправимой команды, и они захоронили это вещество в яме, расположенной еще в двух сотнях метрах далее в камышовом болоте. Несколько месяцев спустя они сдались и в конце ночи препоручили это соединение дну залива Сан-Франциско.

Для объяснения появления следующей группы работавших в области ракетного топлива следует немного отступить назад и свернуть на другую тропинку. С самого начала эксплуатантам не нравились предложенные исследователями топлива не только в силу их врожденных недостатков, но и просто потому, что это был не бензин. Они уже имели дело с бензином и использовали его в больших количествах, так что зачем им было иметь неприятности с чем-то ещё. Но, как уже было показано, бензин не является хорошим горючим в сочетании с азотной кислотой, и эксплуатантам пришлось примириться с данным фактом, что они и сделали с неохотой. Но в течение конца 40-ых и в начале 50-ых ВМФ и ВВС интенсивно заменяли поршневые самолеты на реактивные и начали закупать реактивное горючее вместо бензина. Так что всё дело стало поворачиваться другой стороной, и они начали требовать от разработчиков своих ракет, чтобы указанные ракеты заправлялись реактивным топливом.

Далее, что есть реактивное горючее? Ответ может быть разным. Реактивный двигатель отличается замечательной всеядностью и работает, или может быть сделан работающим, буквально на всем, что горит и может быть направлено в поток, начиная с угольной пыли и заканчивая водородом. Но эксплуатанты решили путем создания спецификаций реактивного горючего, которое они собирались закупать, что наиболее важным соображением должна быть доступность и удобство в обращении. Так что по причине того, что нефть была наиболее подходящим источником термальной энергии в стране, и в силу того, что сервисные службы

постоянно имели дело с нефтепродуктами и знали всё о них, было решено, что реактивное горючее должно быть производным нефти – керосином.

Первым горючим, чьи спецификации были описаны как JP-1, стал узкофракционный сильно парафинированный керосин. Нефтяные компании указали, что немногие НПЗ в стране могли произвести такой продукт с учётом доступного им оборудования и сырья, и это может в итоге ограничить объёмы производства. Так что следующая спецификация JP-3 (JP-2 было так и не выпущенным экспериментальным горючим) отличалась замечательной гибкостью с широким диапазоном фракций и температур дисциляции и настолько низкими требованиями к содержанию олефинов и ароматики, что любое НПЗ уровня выше, чем аппарат самогонщика из Кентуки, могло превратить как минимум половину сырой нефти в реактивное горючее. На этот раз дело зашло слишком далеко, допустив настолько значительную часть низкокипящих компонент, что у реактивного самолета на большой высоте выпаривалась существенная часть горючего. Так что диапазон фракций был сужен во избежание указанного эффекта, но разрешенная доля ароматики и олефинов (25 и 5 процентов соответственно) не была уменьшена. Результатом стал JP-4 с самыми доступными спецификациями с времен Coal Oil Джона Рокфеллера Старшего. Это стало стандартом НАТО и является обычным горючим для всего от Боинга 707 до F-111 (после этого были получены JP-5 и JP-6, но они не заменили JP-4. RP-1 же является отдельной историей, требующей особого рассказа).

Но попытка прожигания JP-3 или JP-4 в ракетном двигателе с азотной кислотой была мучительным опытом. Во-первых, с теми спецификациями, что использовались, не было двух похожих бочек с горючим (реактивный двигатель при сжигании не заботит форма молекул по модулю выделения подходящего количества энергии на килограмм массы, но двигатель на основе азотной кислоты более привередлив). Эти топлива не самовосламенялись с кислотой, но реагировали с ней и производили все виды смол, напай, странного вида окрашенные соединения – и, в итоге, кучу проблем. И если даже вам удавалось все это запустить (скажем, при помощи самовосламеняемого стержня), то иногда всё шло нормально, но обычно это было не так. Это снова и снова были кислота и бензин – кашляющий, поперхнувшийся, рычащий двигатель, который обычно разваливался на части, доводя инженеров до полнейшего богохульства. Было опробовано всё, что могло сделать процесс горения мягче – начиная с катализаторов в кислоте и заканчивая колдовством вуду. Самая хитрая уловка, о которой я слышал, была опробована Bell Aeronautic, когда кому-то пришла в голову блестящая идея о том, что звуковые колебания ракетного двигателя могут привести к лучшему горению. Так что была сделана запись со звуком работающего двигателя и проиграна снова для компонент в надежде, что они могут быть смешаны (или посрамлены) для гладкого сгорания (почему бы и нет, если всё другое уже было опробовано). Но увы, этот подход не оправдал надежд, и стало совершенно очевидно, что JP не работал в отношении ракетных дел.

Всё это было известно, когда программа ВМФ «Ракетные топлива, производимые из нефти» была начата весной 1951 года, хотя это и не было официальным названием до наступления следующего года. Если вы не можете заставить JP работать, то может быть вы создадите какое-нибудь (дешевое, по вашему мнению)

производное нефти, которое будет годиться для этих целей. Или, возможно, оно может быть смешано с JP и сделает его сгорание мягче при разумном соотношении в смеси.

Название программы было обманчиво, «производное» является гибким понятием, и имело место сомнение, что высшие чины Бюро Аэронавтики осознавали, что они одобрили. Но химики «на земле» в Ракетном Подразделении отлично понимали тот факт, что хороший специалист в условиях ограничения времени и финансов может создать из нефти, если только он этого пожелает, практически любую органику вплоть до РНК. Подрядчикам было сказано для усиления эффекта – «Действуй, Мак – посмотрим, что у тебя получится. И если это будет достаточно годным, мы найдем какой-нибудь способ производства его из нефти».

Подрядчиками, объединившими свои усилия с California Research были Shell Development Co., Standard Oil of Indiana, Phillips Petroleum и Chemical Engineering Department of New York University (NYU), и в следующие два или три года непрерывно продолжался проект по исследованию задержки зажигания. Каждая лаборатория при получении самовоспламеняемой добавки отправляла образцы всем остальным, кто смешивал её со стандартными несамовоспламеняемыми горючими и затем измерял задержку зажигания смеси. Стандартными топливами для этого служили в основном толуол и n-гептан, хотя NYU, скорее всего стараясь подчеркнуть свою академическую независимость, использовали лёгкий бензин и n-гексан (JP практически не использовался как эталонное горючее в силу того, что не было двух похожих образцов).

Что же до топлива и/или добавок, которые были ими синтезированы, Шелл и NYU сконцентрировались на соединениях ацетилена, и Филипс сфокусировал основные усилия на аминах. Что же до Standard of Indiana, то эта организация внезапно отклонилась от темы. Несомненно ревнуя к своей сестринской компании в Калифорнии и решив её превзойти, они полностью вышли за пределы соединений серы и усиленно занялись фосфорными производными. Ими были исследованы смешанные замещённые фосфины начиная с тиметилового фосфина, затем с бутиловым и октиловым фосфинами и заканчивая монохлоро (диметиламиновым) фосфином, а затем они удачно остановились на алкиловом тритиофосфите с общей формулой $(RS)_3P$, где R могло быть метилом, этилом и вообще чем угодно. То, чему они удивили самое большое внимание, стали «смешанные алкиловые тритиофосфиты», которые были, в основном, этиловыми и метиловыми соединениями. Их достоинства являлись такими же, что и у меркаптанов – самовоспламеняемость, хорошей плотностью и отсутствием коррозионных проблем, но недостатки совпадали с бедой меркаптанов – и в большой степени. Эффективность была ниже, чем у меркаптанов, а запах, будучи не так силен, как у созданий Пино, был весьма и несказанно отвратителен. Более того, их структура имела жуткое сходство с таковой у G-агентов, или «нервно-паралитических газов», и некоторых инсектицидов, что так напугало Рейчала Карлсона. Эта обеспокоенность была обоснована, так как когда некоторые алкилтиофосфиты были прожжены в NARTS, два ракетных механика оказались в госпитале после того, как они были немедленно и насильственно эвакуированы со станции. Standard of Indiana привлекла большое внимание к этим соединениям и даже была проведена конференция в марте 1953 года, но каким-то образом, подобно меркаптанам, они не вызывали энтузиазма у

перспективных пользователей. Оба типа горючего в наше время остались только в качестве зловонных воспоминаний.

Причины начала работ с ацетиленом не слишком ясны. Было показано (среди прочих Луи Раппом и Майком Пино), что двойные и тройные связи приводят к самовосламеняемому зажиганию, и было разумным предположить, что также это приведёт к гладкому горению, как только к топливной молекуле будет прикручена слабая точка, где может начаться процесс окисления. Более того, ацетилен как родительская молекула всего семейства всегда с надеждой рассматривался людьми, работавшими в этой области. Дополнительная энергия, запасённая при помощи тройной связи, должна была привести к хорошей производительности, хотя малое содержание водорода в молекуле могло сыграть противоположную роль (см. главу, посвященную эффективности). Но чистый жидкий ацетилен слишком опасен для каждодневного использования, обладая прискорбной тенденцией к детонации без повода и предупреждения. Возможно, что какие-то его производные могут обладать менее живым характером, и была ещё одна причина приглядываться к ацетиленам.

Множество хороших парней рассматривали некоторые необычные, если не сказать причудливые, реактивные циклы в начале 50-ых, и одним из них была прямоточная ракета. Эта ракета, обычно монотопливная, расположена внутри и окружена снаружи прямоточным двигателем. Этот двигатель не может работать до разгона до высоких скоростей в атмосфере, и, следовательно, должен быть разогнан до рабочего состояния ракетой или каким-то другим образом. Если ракета, вложенная в прямоточную ракету, разгонит всё изделие до рабочих ускорений, и если она будет производить горючие истекающие газы, могущие быть топливом для прямоточного двигателя — что же, тогда вы могли бы построить крылатую ракету, для которой не нужен ускоритель и при этом потребляющую меньше топлива, чем обычная ракета. Скажем, вы сжигаете пропан или метиловый ацетилен в монотопливной ракете, и истекающие продукты состоят в основном из метана и мелкодисперсного элементарного углерода. Тогда углерод и метан могут быть сожжены в потоке воздуха в прямоточном двигателе, превращаясь в воду и углекислый газ, а вы пользуетесь преимуществами обоих миров (оксид этилена C_2H_4O , чьи продукты разложения состоят из метана и угарного газа, был рассмотрен для подобного рода цикла). Так что ацетилен выглядел подходящим для прямоточной ракеты.

И, наконец, ацетилен довольно легко производить на основе сырья до нефтяной промышленности путем крекинга и частичного окисления. Подходы NYU и Шелл к задаче ацетилена были совершенно разные, NYU опробовал несколько дюжин соединений семейства, в то время как Шелл сфокусировалась на всего двоих, и затем начала поиск добавок, которые могли бы привести к подходящим топливам. Первым соединением из этой пары был 1,6-гептадиен со структурной формулой $C \equiv C - C - C - C - C \equiv C$, второй представлял собой 2-

метил-1-бутен-3-ин, также известный под названием «изопропенилацетилен» или

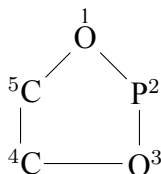
$$\begin{array}{c} C \\ | \\ C = C - C \equiv C \end{array}$$

«(метилвинил)-ацетилен» со структурной формулой. Одним из источников путаницы в истории ацетиленов была множественность систем их

именования!

Первыми всесторонне исследованными добавками были метиловые производные фосфотриамида $P(NH_2)_3$ с метильными группами, замещающими от трех до шести атомов водорода. Это работало, но настолько много добавки требовалось для нормального зажигания, что она становилась основной компонентой смеси, и к тому же было даже возможно взрывное возгорание.

Тогда была опробована производная 1,3,2-диоксафосфолана



и выбор был окончательно остановлен на 2-диметиламин-4-метил-1,3,2-диоксафосфослане, который обычно с сочувствием назывался «эталонным горючим 208». И снова, оно не было удачным в качестве добавки, но, будучи очищенным, являлось одним из самых быстрых в самовоспламенении из когда-либо наблюдавшихся. Это соединение не было особенно токсичным и могло стать вполне неплохой «рабочей лошадкой» в качестве горючего, но прежде чем основная часть работы была для него выполнена, последующие события сразу же сделали его устаревшим. И теперь оно полностью забыто.

Между 1951 и 1955 годами Хаппел и Марсел из NYU подготовили и охарактеризовали порядка пятидесяти ацетиленовых: углеводородов, спиртов, эфиров, аминов и нитрилов. Они по сложности различались от пропина, или метилацетилен, $C \equiv C - C$ до таких вещей, как соединение ди(метилвинил)-диацетилен

$C \equiv C - C \equiv C - C \equiv C - C \equiv C$ с не менее чем четырьмя множественными связями. Наивысшая точка ненасыщенности была достигнута с бутиндинитрилом, или дицианоацетиленом, $N \equiv C - C \equiv C - C \equiv N$, который совсем не содержал атомов водорода, но обладал тремя тройными связями. Это соединение было бесполезно в качестве горючего, являясь нестабильным с одной стороны и имея слишком высокую точку замерзания с другой, но тем не менее получило свои пятнадцать минут славы. Будучи прожжёнными с озоном в лабораторной эксперименте профессора Гроссе из Temple University (которому всегда нравилось жить на грани), оно достигло установившейся температуры в районе 6000K, равной таковой для поверхности солнца.

Многие, если не большинство, ацетилены плохо сохранялись и имели склонность к образованию смол и гелей при хранении, а также к формированию взрывчатых пероксидов при контакте с атмосферой. Многие из них были чувствительны к удару и разлагались со взрывом по незначительной причине или вообще без таковой. Соединение вроде дивинилдиацетилен вполне может быть описано как происшествие, готовое вскоре произойти. В то время как некоторые из ацетиленов были удачно испытаны в ракете (RMI прожгла пропин, метилвинилацетилен, метилдивинилацетилен и диметилвинилацетилен, все с кислородом), выяснилось, что они не являются подходящими горючими для азотной кислоты. Обычно имела место детонация при контакте с окислителем, что могут подтвердить владельцы

куч обломков, изначально бывших оборудованием по измерению задержки зажигания.

Но некоторые из этих соединений показали себя многообещающими в качестве монотоплив и добавок, и Air Reduction Co., занявшаяся этой темой в районе середины 1953 года, в 1955 году развернула коммерческое производство пропина, метилвинилацетилена и диметилвинилацетилена.

Некоторые из этих соединений были отличными добавками для JP-4. В августе 1953 года RMI продемонстрировала, что всего лишь 10 процентов метилвинилацетилена в составе JP-4 приводит к плавному горению с КДАК для широкого диапазона соотношений компонент и серьёзно улучшает процесс зажигания. В случае самовосламеняющегося стержня переход горения на рабочее топливо был гладким и не сопровождалось инцидентами и, собственно говоря, зажигание легко могло быть достигнуто при помощи порохового пиропатрона совсем без использования иницилирующего элемента. Несколько других соединений дали тот же эффект, но к тому моменту, когда это было выяснено, ацетилены стали достоянием истории, и их разработка была завершена только для того, чтобы вся программа стала прекращённой.

Гомер Фокс и Говард Бост выполнили анилиновую программу в Филлипс Петролиум. Связь между аминами и нефтью в лучшем случае может быть описана как незначительная, но первые какое-то время использовались как горючее (триэтиламин входил в состав Тонки) и выглядели неплохо, хотя и не подвергались систематическому изучению в качестве топлива. Данное подразделение Филлипс занялось этим и исследовало амины в бесконечном разнообразии: основные, вторичные и третичные, насыщенные и ненасыщенные, аллиловые и пропаргиловые, моноамины, диамины и даже триамины и тетраамины. Учёные должны были синтезировать и проанализировать по крайней мере сорок алифатических аминов, включая нескольких с другими функциональными группами – ОН-группами и эфирными связями.

Внимание было сфокусировано на третичных полиаминах, что было довольно логично. Было известно, что третичные амины обычно самовосламенялись с азотной кислотой, и было разумно предположить, что ди- и три-третичные амины могут иметь такое же поведение (это предположение оказалось верным, но следует упомянуть замечание Э.Т. Белла, что великим пороком древних греков была не содомия, а метод экстраполяции). Данные соединения были исследованы начиная с 1,2 бис (диметиламин) этана до таких диковинок, как 1,2,3 трис (диметиламин) пропан и четвертичный (диэтиламинометил) метан, который может быть изображен в виде молекулы неопентана с диметиламиновой группой на каждой грани. Случайным образом выяснилось, что данное соединение имеет неприемлемо высокую точку замерзания, которая, исходя из симметрии молекулы, могла быть предсказана. И это приводит к подозрению, что некоторые из любопытных аминов были синтезированы не по той причине, что они предположительно имели преимущества над другими, а попросту для того, чтобы показать виртуозность человека на скамейке запасных, желавшего доказать, что ему это под силу.

Третичные диамины являлись одними из тех соединений, что были действительно подробно проработаны, и практически каждое структурное изменение и их последствия были исследованы. Таким образом, были проверены следствия

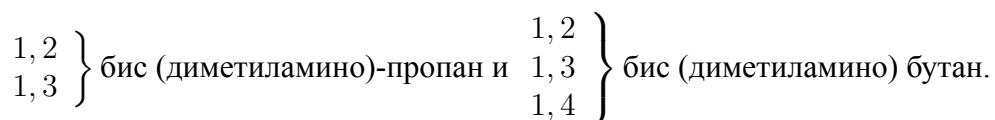
модификаций терминальных групп подобно серии:

1,2 бис (диметил или этил или аллиламино) этан.

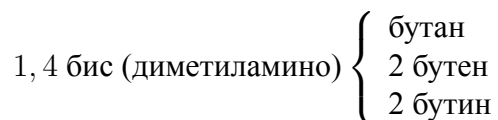
Или, варьируя длину центральной углеводородной цепочки как в



Затем амино-группы были передвинуты как



Также был исследован эффект ненасыщения в рядах вида



Кроме того, были опробованы всевозможные преобразования и комбинации данных изменений, так же как и добавление групп ОН и эфирных связей.

Как и могло ожидать, введение гидроксильных групп приводило к соединениям, которые являлись чрезвычайно вязкими при низких температурах (триэтанолламин, рассматриваемый в качестве горючего, является наиболее ярким примером данного эффекта и по этой причине не использовался). Аллилзамещённые амины также весьма вязки и подверженные окислению в атмосфере. С другой стороны, как и следовало ожидать, все эти соединения были очень похожи, и сложные по составу ничем не превосходили простые, что также оказалось вполне предсказуемым.

Ничто из них не представляло собой хорошей добавки к реактивному горючему, они ни улучшали горение, ни, кроме случая чрезвычайно высокой концентрации, делали горючее самовоспламеняющимся. Однако они выглядели многообещающими в качестве чистого топлива, и Филлипс доставил образцы четырёх соединений в Wright Air Development Center для тестового прожига. Все они были бис (диметиламинового) типа, 1,2 этан, 1,2 и 1,3 пропан и 1,3-1 бутен.

В 1956 году Джек Гордон проверил как их свойства, так и условия производства и доставки, а также прожег в WADC с КДАК. Эти соединения оказались хорошими горючими, воспламенение было самостоятельным и быстрым, горение было хорошим, эффективность внушала уважение, и по крайней мере насыщенные формы были довольно стабильными и подходящими для регенеративного охлаждения.

И все они тоже устарели ещё при рождении.

Вся эта выполненная работа не рассматривалась слишком серьёзно, ибо большим кушем был гидразин. Это было горючее, которое все хотели использовать,

оно обладало высокой эффективностью, хорошей плотностью, самовосламеняемостью с долгохранимыми окислителями, короче говоря, имело все необходимые качества. Почти.

Это соединение являлось дорогим, но сама природа химической индустрии была и остается таковой, что можно быть уверенным в снижении стоимости до разумных пределов при условии, что все нуждаются в нём, причём в большом количестве. Гидразин был отчасти чувствителен в каталитическому разложению, но если вы использовали подходящие материалы для изготовления хранилищ и были разумно осторожны в отношении загрязнений, это не представляет собой серьёзной проблемы. Но вот точка замерзания $-1,5^{\circ}\text{C}$ была слишком высока для всего, что предполагалось использовать в тактической ракете. Эксплуатанты были в особенности неприступны в отношении установки подходящих им предельных лимитов на температуры замерзания, и имелось ощущение, что вначале они требуют невозможное, а потом соглашаются с тем, что могут получить – но в конце концов было решено что температура -65°F , или -54°C , будет приемлемой для большинства применений (хотя ВМФ в течение одного из особенно капризных периодов времени запрашивали точку замерзания не выше чем -100°F , или -73°C . То, как они собирались воевать при такой температуре, не было описано, и бытовало мнение, что флот попросту был заморожен магической красотой числа).

Так что все пробовали снизить точку замерзания гидразина до -54°C без ухудшения других (и хороших) свойств, что оказалось невозможным. Это могло бы быть предсказано, но в тот момент времени мы все надеялись на чудо.

От начала и до конца восемь организаций были вовлечены в это занятие: Aerojet, ЛРД, Metaelectro Co., NARTS, Naval Ordnance Test Station (NOTS), North American Aviation, Reaction Motors и Syracuse University.

Первым опробованным депрессантом температуры замерзания была, хотя и непроизвольно, вода. Гидрат гидразина, будучи на 36 процентов водой, имел точку замерзания $-51,7^{\circ}\text{C}$ и смесь, содержащая 42 процента воды, застывала при -54°C (В.И. Семишин в СССР частично построил в 1938 году фазовую диаграмму для пары гидразин-вода, Мор и Аудрих в 1949 году в США и Хилл и Саммер в 1951 году в Англии завершили эту работу). Но вода была чрезвычайно плохой добавкой для горючего, она ничего не прибавляла к энергетике системы, и, будучи просто балластом, серьёзно ухудшала эффективность.

Аммиак был не так уж плох, Ф. Фредерикс в 1913 и 1923 годах выдал отчет с фазовой диаграммой гидразин-аммиак, которая была также исследована Д.Д. Томасом из ЛРД в 1948 году. Аммиак, в отличие от воды, был горючим, но это очень стабильное соединение, и высокая температура горения не была тем, что хотелось получить. И для снижения температуры замерзания до -54°C необходимо было добавить в гидразин порядка 61 процента аммиака! Это не только резко уменьшала эффективность, но также снижало плотность горючего, и, ко всему прочему, настолько увеличивало давление паров, что смесь начинала кипеть при -25°C вместо температуры кипения $+113^{\circ}\text{C}$ у чистого гидразина. Дейв Хорвитц из RMI исследовал третичные смеси гидразина, воды и аммиака в 1950 году, но не смог найти ничего, что обладало как приемлемой температурой замерзания, так и большим содержанием гидразина. Так что вода и аммиак не были решением задачи.

Ещё одной добавкой, исследованной RMI в 1947 году, был метанол. Состоявшая из 44 процентов гидразина и 56 процента спирта смесь замерзала при -54°C , и её остальные физические свойства были приемлемыми, но это приводило к неэффективности, существенно худшей, чем у чистого гидразина. Несколько лет спустя в силу описанных далее обстоятельств, интерес к данной смеси возник снова.

Дону Армстронгу из Аэроджет летом 1948 года пришла в голову некая идея, казавшаяся чрезвычайно многообещающей на тот момент. Им было обнаружено, что добавление 13 процентов боргидрида лития к гидразину приводит к смеси, чья (эвтектическая) точка замерзания равнялась -49°C . Всё ещё не магическое число -54°C , но уже что-то. Плотность отчасти уменьшилась с 1,004 до около 0,93, но борогидрид сам по себе был столь энергетическим соединением, что не было причин ожидать никакого особенного ухудшения эффективности. Но, увы, триумф Дона оказался иллюзорным. После прохождения некоторого времени оказалось, что смесь по сути своей нестабильна и медленно и неумолимо разлагается, постоянно высвобождая водород. От данной идеи полностью отказались в районе 1952 года, хотя RMI и продолжала работать по крайней мере до 1958, и даже около 1966 или 1967 года кто-то ещё предложил использовать LiBH_4 в качестве средства снижения температуры замерзания для гидразина! Этот факт может означать что-то ещё помимо совершенного и угнетающего игнорирования истории чьей-то собственной технологии, но я не уверен в этом.

Примерно в это же время Т.Л. Томсон из North American, выдвинул ещё одну добавку для точки замерзания, чьим основным недостатком, несмотря на плохую устойчивость к нагреванию, было то, что это соединение до смерти всех напугало. Им было найдено, что 15 процентов синильной кислоты HCN должно снизить точку замерзания гидразина до -54°C . Но одна лишь только мысль о HCN настолько всех ужаснула (при том, что гораздо более токсичные соединения были и будут подвергнуты исследованию без особых замечаний в их отношении), что данная смесь не была одобрена.

В тот период времени (1949-1950) NOTS разрабатывала ракету LAR, и Э.Д. Камбелл с коллегами пришли к горючему для неё с низкой точкой замерзания, смешав 67 процентов гидразина и 33 процента тиоцианата аммония с температурой замерзания -54°C . С этим можно было иметь дело, хотя эффективность слегка уменьшилась, и давление паров было высоко для удобного обращения.

В начале 1951 года Дейв Хорвитц в Metallelectro Co. (куда он перешел из RMI) исследовал гидразиново-анилиновые смеси и нашел эвтектическое соединение с точкой замерзания -36°C , содержащее только 17 процентов гидразина. Затем он начал добавлять метиламин к смеси для уменьшения как вязкости, так и точки замерзания, и, в конце концов, пришел с гидразиново-анилиново-метиламиновой смеси (уважительно названной «НАМ Juice»), замерзавшей при -50°C , но содержавшей только 9,1 процента гидразина с 19,3 метиламина и 71,6 анилина. Эта смесь была довольно подробно исследована и была испытана при прожиге, но не стала искомым ответом на вопрос (но Сухопутные Войска добавили в 1953 году 5 процентов гидразина в своё анилиново-фурилово спиртовое горючее для ракеты Corporal, и спустя три года увеличила содержание гидразина до 7 процентов).

Одной из наиболее подробно исследованных добавок был нитрат гидразина. Аммиачный аналог смеси – нитрат аммиака, растворенный в аммиаке, или рас-

твор Дивера – был известен много лет, так что идея была вполне очевидной, и, во-видимому, несколько человек независимо пришли к ней в одно и то же время. Dwiggins в Naval Ordnance Laboratory (NOL) и моя группа в NARTS исследовали систему в 1951 году, и к концу 1953 года J. M. Corcoran с коллегами в NOTS проверили полную систему гидразин-нитрат гидразина-вода. Смесь, содержащая 55 процента гидразина и 45 процента нитрата гидразина, замерзала при температуре ниже -40°C , и магическое число -54°C могло быть получено при содержании 54 процентов гидразина, 33 нитрата и 13 воды. Это было неплохо, но, как обычно, возникала пара затруднений. Смесь была довольно вязкой при низких температурах и имела тенденцию к взмывливанию, что могло привести к проблемам при использовании насосной системы питания. Но что было самым главным, так это то, что большинство из на самом деле удобных смесей с низким содержанием воды могли с пугающей легкостью детонировать (а сухой нитрат гидразина без соответствующего бережного обращения мог произвести нечто, чрезвычайно похожее на огонь башенных орудий. Это было обнаружено группой NARTS!). Но некоторые из смесей могли быть использованы как монотоплива, в таком качестве были интенсивно исследованы в течение нескольких лет, и некоторые из них были опробованы в качестве жидкого оружейного пороха.

Группа NARTS, не довольствуясь одними нитратами, опробовала перхлорат гидразина в качестве депрессанта в 1951 году и обнаружила, что смесь, содержащая 49 процентов гидразина, 41,5 перхлората и 8,5 воды, всё ещё оставалась жидкой при -54°C . Но она детонировала даже с большей вероятностью, чем смеси нитратов (во время попытки исследования термической стабильности мы пробили дыру в потолке лаборатории), и я обнаружил, чуть не оторвав себе голову в процессе, что не будет лучшим на свете советом высушить полугидрат перхлората гидразина (в форме, при которой он кристаллизуется) до состояния безводной соли. Так что, хотя перхлоратная смесь была более энергоёмкой по сравнению с нитратными смесями, она оказалась вне рамок практического использования. Тем не менее, Уолкер из Syracuse University опробовал моногидрат перхлората натрия в течение года и более, и обнаружил, что 50-процентная смесь с гидразином замерзает при приблизительно -46°C . Каким-то образом ему удалось это проделать, оставшись в живых.

Различными группами было опробовано с небольшим успехом или вообще без всякого результата множество других депрессантов точки замерзания, и быстро становилось очевидно, что подход, основанный на добавках, заводит в никуда. Вы или рушите эффективность или, с большой вероятностью, в буквальном смысле теряете голову, поэтому что-то новое должно было придти в голову разработчиков.

К прорыву привела программа ВМФ. В начале 1951 года Ракетное Подразделение Бюро Аэронавтики выдала контракты Metalllectro и Аэроджет для синтеза некоторых гидразиновых производных и проверки их в качестве ракетного горючего. Этими тремя производными были монометилгидразин, симметричный диметилгидразин и несимметричный диметилгидразин. Была надежда, что очень небольшое изменение в структуре – и вы едва ли можете модифицировать её меньше, чем путем добавления метиловой группы – может дать разумную точку замерзания без серьёзного затрагивания энергетики.

В NARTS у меня была точно такая же идея и, заполучив в свои руки фунт монометилгидразина (он стоил 50 долларов), я исследовал его смеси с гидразином и до конца года рекомендовал эвтектику, содержащую 12 процентов гидразина и замерзавшую при -61°C , как *то самое* топливо, на котором стоит сконцентрироваться.³ Эффективность с HNO_3 была около 98 процентов таковой у чистого гидразина, плотность была не так плоха (0,89), точка замерзания была великолепна, вязкость не являла собой никакого беспокойства, хранение и обращение не казалось представляющим собой какие-то особые проблемы, хотя метилгидразин и оказался чуть более чувствительным к каталитическому разложению, чем родительское соединение.

У Metallocro и Аэроджет не заняло очень много времени осознать, что они обнаружили нечто стоящее. Симметричный диметилгидразин оказался неподходящим для своей роли (его точка замерзания составляла только $-8,9^{\circ}$), но монометилгидразин (с этого момента сокращенно называемый ММГ) плавился при $-52,4^{\circ}\text{C}$, а несимметричный диметилгидразин (НДМГ) при $-57,2^{\circ}\text{C}$. А как выяснили Дейв Хорвитц и Metallocro, эвтектическая смесь 60-40 НДМГ-ММГ замерзала лишь при -80°C , или -112°F , таким образом превзойдя мистическую температуру ВМФ. Более того, вязкость смеси при их магической цифре -100°F была только 50 сантипуазов, так что она в самом деле могла быть использована при такой температуре. В то же время, Астон с коллегами в Pennsylvania State College выясняли термодинамические свойства (теплоту образования, теплоемкость, теплоту испарения и т.д.) замещенных гидразинов, и к 1953 году почти каждый полезный кусок информации о НДМГ и ММГ был прочно задокументирован.

Оба соединения являлись отличными топливами, и вопросом, который должен был быть решен, являлось то, на чём же в итоге стоило сконцентрироваться. Симпозиум по гидразину и его производным, а также их применениям, прошел в феврале 1953 года, и проблема обсуждалась долго и с жаром. ММГ был слегка плотнее чем НДМГ и обладал чуть более высокой эффективностью, с другой стороны, НДМГ был менее подвержен каталитическому разложению и имел лучшую термическую устойчивость, что легко позволяло его использование для генеративного охлаждения. Любой из них мог использоваться в качестве горючей добавки для JP-4, но НДМГ растворялся лучше и мог выдерживать большее количество воды в горючем без разделения на фракции. Оба соединения самовоспламенялись с азотной кислотой, но НДМГ делал это быстрее – конце концов, это был не только гидразин, но также и третичный амин. И эта пара хорошо работала в качестве топлива с эффективностью выше, чем у третичных аминов или любых фосфорных и серных соединений, а также старых горючих по типу анилина и фурилового спирта. Моя ММГ-гидразиновая смесь была прожжена в NARTS в начале 1954 года, НДМГ был испытан в WADC примерно в это же самое время, ММГ чуть позже и эвтектическая смесь НДМГ-ММГ тем же самым агентством в течение 1955 года – и все с красной дымящей азотной кислотой. И НДМГ в JP-4 работал настолько хорошо в отношении смягчения горения, что топливо, выбранное для ракеты Найк-Аякс, представляло собой 17 процентов НДМГ в JP-4. Программа замещения гидразина была завершена с оглушительным успехом и разом

³ MNF-3, представленный Reaction Motors несколько лет спустя, является 86% монометилгидразина и 14% гидразина. «И нет ничего нового под солнцем.»

сделала остальные долгохраняемые топлива совершенно устаревшими.

Окончательное решение сконцентрироваться на НДМГ было принято из экономических соображений. Двумя соперниками за первый контракт для промышленного производства замещённых гидразинов были Metallelectro и подразделение Westvaco Chlor-Alkali фирмы Food Machinery and Chemical Co. (FMC). Компания Metallelectro предложил модификацию классического процесса Рашига для гидразина путем реакции хлорамина с моно- и диметиламином в соответствии с одним из двух затребованных заказчиком гидразинов. И в своей контрактной заявке они предложили аккуратно проработанную шкалу цен, зависевшую от размера заказа.

Westvaco принял другой подход и предложил ещё один синтез, в котором азотистая кислота реагировала с диметиламином для формирования нитрозодиметиламина, который с лёгкостью может быть сведен к НДМГ. Данный процесс не может быть использован для ММГ, так что Westvaco игнорировал его и был готов к потерям, вызванными первоначальными заказами (в конце концов, размеры оплаты были ничтожными с точки зрения компании размера FMC), и решительно перебил заявку Metallelectro. Они получили заказ, и Metallelectro по хорошему исчезли со сцены. Первоначальные описания государственного стандарта для НДМГ были опубликованы в сентябре 1955 года.

Но это не сдержало рекламное подразделение Westvaco. Испытав головокружение от успеха и принимая во внимание или игнорируя государственный стандарт, они попытались ухватить добычу в виде торговой марки и назвали свой продукт «DIMAZIN – торговая марка НДМГ от Westvaco», настаивая, чтобы все их сотрудники ссылались на это название. Мне было жалко некоторых их химиков, посещавших различные агентства, занимавшихся ракетными делами, при этом послушно и смущённо следовавших приказам среди непристойных возгласов от высокоискушенной публики, которой, как и им самим, был известен тот факт, что НДМГ от Westvaco являлся абсолютно неотличимым от продукта, произведенного Olin Mathieson или любой другой компанией.

Предпринималось несколько попыток улучшить НДМГ. Насколько мы видели, Майк Пино из California Research отработал некоторые аллиловые амины, в 1954 году он продвинулся немногим дальше и пришел к моно- и несимметричному диаллиловому гидразинам. Они были интересны, но не имея особого преимущества перед НДМГ, были чувствительны к окислению и полимеризации. И чуть позже сотрудники Dow Chemical произвели монопропаргилгидразин и несимметричный дипропаргилгидразин – и снова не было улучшения, а, кроме того, оба соединения являлись ужасно вязкими при низких температурах. В NOTS Макбрайд и его группа, изучая окислительную химию НДМГ, пришли к тетраметилтетразину $(\text{CH}_3)_2\text{N}-\text{N}=\text{N}-\text{N}(\text{CH}_3)_2$, но его преимущество в эффективности над НДМГ не заслуживало внимания, а точка замерзания была довольно высока.

Так что НДМГ в течение нескольких лет был *подходящим* топливом для прожигания с азотной кислотой или N_2O_4 . Но для конструкторов, пытавшихся выжать последнюю секунду удельного импульса из своих двигателей, ММГ становился всё популярнее (и теперь он также имеет государственный стандарт!). И в тех применениях, где не важна низкая точка замерзания, гидразин используется сам по себе как в чистом виде, так и в смеси со своими производными. Горючее МБР Титан II не обладает низкой температурой замерзания в силу того, что

эта ракета размещена в прогреваемом паром отверстии в грунте, но при этом она *действительно* нуждается в высокой, насколько только это возможно, эффективности, и гидразин является главным кандидатом для этой работы. Но поскольку он имеет неприятную склонность к детонации при попытке его использования в качестве регенеративного охладителя, окончательно выбранным горючим стала 50-50 смесь гидразина и НДМГ, названная «Аэрозин 50» компанией Аэроджет, первой его получившей, и «50-50» всеми остальными.

В настоящее время в распоряжении имеется замечательное разнообразие горючих гидразиновых типа с названиями типа MAF-3 (Mixed Amine Fuel-3), или MHF-5 (Mixed Hydrazine Fuel-5), или Hydyne, или Аэрозин-50, или Hydrazoid N, или U-DETA, или каким угодно ещё. Но какое бы название не использовалось, топливо представляет собой смесь двух или трёх составляющих: гидразин, НДМГ, диэтилентриамин (DETA, добавленный для увеличения плотности), ацетонитрил (добавленный для снижения вязкости смесей, содержащих DETA) и нитрат гидразина. И для одного специального применения (в двигателе ориентации космического аппарата Surveyor) к ММГ было добавлено достаточно воды для создания моногидрата с гораздо лучшими по сравнению с безводными соединениями охлаждающими свойствами. Кандидатом для добавления в список был дигидразиноэтилен ($\text{H}_3\text{N}_2\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_2\text{H}_3$), синтезированный Dow в начале 1962 года. Сам по себе он не был в особенности полезен (его точка замерзания равнялась $12,8^\circ\text{C}$), но плотность была высока (1,09), и соединение могло превосходить DETA в качестве добавки, увеличивавшей данное свойство.

Так что теперь разработчик имеет в своем распоряжении семейство высокопроизводительных горючих – надежных, лёгких в обращении и доступных. Какую смесь он выберет – или даже составит по случаю – зависит от конкретных требований к работе, которую ему предстоит выполнить. И он знает, что это работает, что, по крайней мере, является движением вперед.

Глава 4

... и его подружкой

КДАК в 1945 году ненавиделась абсолютной и нескончаемой ненавистью всеми теми, кому приходилось иметь хоть какое-то дело с ней, и на то были причины. Прежде всего, она была фантастически коррозионной. Если вы хранили её в алюминиевом баке, очевидным образом ничего особенного не происходило – до тех пор, пока погода была тёплой. Но при охлаждении вязкий, желатиновый и белый осадок выпадал и медленно оседал на дно ёмкости для хранения, и этот шлам являлся достаточно вязким для забивания форсунки двигателя при попытке испытания. Подозревалось, что это был какого-то рода сольватированный нитрат алюминия, но отвращение, испытываемое к нему, равнялось только сложности его анализа.

Если вы пытаетесь хранить кислоту в нержавеющей стали (SS-347 подходила лучше всего для этой цели), тогда всё становится ещё хуже. Коррозия происходила быстрее, чем в случае алюминия, кислота приобретала жуткий зеленый цвет, и её эффективность серьёзно снижалась, что стало осознаваться по мере обнаружения величины разложения. В районе конца 1947 года ЛРД опубликовала результаты двух анализов кислоты. Первый был образцом КДАК, только что полученной от производителя и начавшей ужасным образом разрушать бак, в котором она была доставлена. Вторым был образец «старой» кислоты, хранившейся несколько месяцев в баке, изготовленном из SS-347. Результаты были красноречивы, и если только мой личный опыт может служить мерилom, на дне бака образовывалось небольшое количество нерастворимого вещества неясного состава. Кислота подобного рода могла быть использована в производстве удобрения, но не годилась в качестве топлива.¹

Компонента	Свежая кислота	Старая кислота
HNO_3	92,6%	73,6%
N_2H_4	6,3%	11,77%
$\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$	0,19%	8,77%

¹Замечание для искушенного читателя: не рассматривайте точное процентное соотношение слишком серьёзно, анализ кислот не был в особенности хорош в 1947 году. Кроме того, для большинства сталей было указано двухвалентное, а не трехвалентное состояние железа, как я это обнаружил в нашей лаборатории (и к моему полнейшему удивлению) несколько лет спустя.

$\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$	0,05%	2,31%
$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$	0,02%	0,71%
H_2O	0,83%	2,83%

Так что кислота не могла храниться неопределенно долго в ракетном баке – или же от него ничего не осталось бы. Она должна была быть заправлена прямо перед запуском, что означало обращение с ней при непосредственной эксплуатации.

Что решительно не доставляло радости. КДАК повреждает кожу и плоть с жадностью стаи пираний (одна её капля привела к шраму, до сих пор сидящем на моей руке пятнадцать лет спустя). И будучи пролитой, она производила плотные облака NO_2 , который был чрезвычайно токсичным газом. Человек глубоко вдыхает его, кашляет несколько минут, и потом настаивает, что он в полной порядке. И на следующий день, прогуливаясь, с более чем высокой вероятностью падает замертво.

Так что заправщики должны были носить защитные костюмы (в которых жутко жарко и которые настолько неудобны, что они скорее вызвали больше происшествий, чем их предотвратили) и лицевые маски, и часто противогазы или изолирующие дыхательные аппараты.

Альтернативой КДАК была смешанная кислота (меланж), а именно БДАК, к которой было добавлено от 10 до 17 процентов H_2SO_4 . Её эффективность была слегка ниже, чем у КДАК (все эти стабильные серные кислоты и их тяжёлые ядра серы в любом случае не оказывают положительного влияния), но плотность была чуть выше, чем у других кислот, и она замечательно самовосламенялась со многими горючими (я раньше пользовался преимуществом данного свойства когда кто-нибудь приходил устраиваться на работу в мою лабораторию. Получив скрытый сигнал, один из моих приспешников бросал палец от старой резиновой перчатки в колбу, содержащую около 100 кубических сантиметров смешанной кислотой – и затем отступал назад. Резина мгновенно разбухла и скручивалась, а затем сильная струя пламени вырывалась из колбы как из реактивного двигателя с соответствующим шипящим звуком. Обычно, исходя из поведения кандидата, я мог сказать, имел ли он подходящий для топливного химика тип нервной системы). Меланж, само собой, не выдавал отмеченные выше пары NO_2 , и все были убеждены, по крайней мере до 1949 года, что он не вызывает коррозии нержавеющей стали. Но в указанном году ВМФ купил несколько сотен двухсотлитровых баков и несколько автоцистерн, все изготовленные из дорогого (баки стоили около 120 долларов каждый) сплава SS-347 и разработанные для хранения смешанной кислоты.

В итоге, все ошиблись. Кислота не оказывала коррозионного воздействия – это вначале. Но после предварительного периода, который мог колебаться от минут до месяцев, и который зависел от разложения кислоты и, в особенности, от содержания воды, температуры, предыдущей истории стали и, возможно, фазы Луны, коррозия начиналась и протекала быстро. Окончательные результаты были хуже, чем с КДАК. Не только снижалось качество кислоты и повреждались баки, но ещё формировался и выпадал тонкий, тяжелый, зелёно-серый осадок тошнотворного вида, неопределённых свойств и загадочного состава. Мне приходилось видеть баки с меланжем с целыми тридцатью сантиметрами осадка на дне. Что ещё хуже, давление постепенно увеличивалось в баке или автоцистерне, поэтому

они должны были периодически вентилироваться. И вода, впитанная им (меланж чрезвычайно гигроскопичен), ускоряла коррозию. В течение двух лет все дорогие автоцистерны и баки ВМФ должны были быть отправлены на свалку.

Ещё одним вариантом была белая дымящая азотная кислота, которая, по крайней мере, не производила смертельно опасные облака NO_2 при испарении. Но её точка замерзания была слишком высока для того, чтобы считаться приемлемой (чистая HNO_3 замерзает при $-41,6^\circ\text{C}$, коммерческая БДАК делает это при температуре на пару градусов ниже). Она была столь же коррозионной, как и КДАК, если даже не в большей степени, и самовоспламенялась со многими горючими хуже, чем красная кислота. И у нее был ещё один туз в рукаве. В течение многих лет было замечено, что в оставленном баке с кислотой медленно повышается давление, и он должен был периодически вентилироваться. Но считалось, что это давление вызвано продуктами, выделявшимися в процессе коррозии, и все не слишком об этом задумывались. Но затем, где-то в начале 1950-го года, начали возникать подозрения. БДАК была помещена в стеклянный контейнер в темное место (для чистоты эксперимента и предотвращения любого рода фотохимических реакций) и, к всеобщему ужасу, было обнаружено, что давление нарастало даже быстрее, чем в алюминиевом баке. Азотная кислота, или по крайней мере БДАК, имела врожденную нестабильность и могла неожиданно разложиться сама по себе. Ситуация была отвратительной.

Четвёртым вариантом был N_2O_4 . Правда, он был ядовит, но если вы могли избежать обращения с ним при непосредственной эксплуатации, это не играло большой роли. И, при условии отсутствия контакта с водой, он был практически некоррозионным для большинства металлов. Вам даже не нужно было хранить его в алюминиевой или нержавеющей ёмкости, для этого годилась и обычная мягкая сталь. Так что ракетные баки могли быть заправлены на заводе, и персонал не видел, не ощущал и не вдыхал бы N_2O_4 . И это соединение было замечательным образом стабильно при хранении и не приводило ни к какому повышению давления. Но его точка замерзания равнялась $-9,3^\circ\text{C}$, что было неприемлемо для эксплуатирующих подразделений.

Так что для четырёх доступных окислителей имелось четыре вида головной боли – и ничего из них, что бы можно было удовлетворительно использовать. Эта ситуация привела к тому, что могло бы быть названо «битвой за кислоту», проходившей в течение около пяти лет, и которая вовлекла почти каждого химика в ракетной области – и кучу других людей.

Без сомнения, для всех имелось в одно и то же время много (и даже слишком много) проблем, и, в результате, исследования пошли по дюжине различных, иногда взаимно противоречащих друг другу, направлений. Несколько групп непосредственно атаковали точку замерзания БДАК, используя всевозможные добавки для снижения этого параметра до приемлемого (или в случае тех безумных -100°F , или -73°C , необоснованного) значения. Как Р.У. Гринвуд из Bell Aircraft, так и Р. О. Миллер из the Lewis Flight Propulsion Laboratory of NASA исследовали нитрат аммония и 50-процентный водный раствор этой соли, 72-процентную хлорную кислоту (безводное соединение было слишком чувствительно для того, чтобы иметь с ним дело) и 50-процентный раствор нитрата калия (сухая соль практически нерастворима в БДАК), предложенный WADC. Они снизили точку

замерзания до нужных им значений, но неприемлемой ценой. Зажигание в двигателе было медленным и часто сопровождалось взрывом, и горение было жестким и неудовлетворительным. И раствор KNO_3 имел ещё один недостаток, который нельзя было предвидеть. Будучи подожженным, исходящий поток содержал высокую концентрацию ионов калия и свободных электронов – фактически плазму – которая жадно поглощала радиоволны и сделала бы практически невозможным наведение ракеты по лучу радара. Greenwood опробовал несколько органических добавок, включая уксусный ангидрид и 2,4,6-тринитрофенол, но это направление вело в тупик. Азотная кислота реагирует с уксусным ангидридом за подходящее время – и так же, как и с тринитрофенолом, заливка топлива с высокой взрывоопасностью не является чрезвычайно хорошей идеей.

У.Х. Шечтер из Callery Chemical Co., руководствуясь более смелостью, чем рассудком, исследовал безводную хлорную кислоту, но обнаружил, что не удастся получить желаемое снижение точки замерзания с процентным соотношением, с которым можно иметь дело, а также опробовал перхлорат нитрония. Он не смог снизить точку замерзания до значений, стоящих упоминания, стабильность смеси была хуже, чем у чистой БДАК, и её коррозионное воздействие было совершенно чудовищным. Ещё одной опробованной им добавкой был нитрометан, что было проверено и А. Злетз из Standard Oil Company of Indiana, кто также исследовал этиловый и 2-пропиловые гомологи. Нитрометан, естественно, был лучшим из всех добавок для снижения температуры замерзания и -100°F , или -73°C , была достигнуто без всякого труда, но смесь было слишком чувствительна и с высокой вероятностью взорвалась бы при любом способе использования.

Майк Пино из California Research опробовал нитрит натрия (что работало, но медленно реагировало с кислотой с образованием в осадке нитрата натрия) и кобальтнитрит натрия и обнаружил, что 4 процента этой соли плюс 1 процент воды снижали точку замерзания безводной кислоты до -65°F , или -54°C , но так и не смог достичь магического значения -100°F , или -73°C , при любом разумном содержании воды. Он всегда очень хорошо осознавал эффект (причем разрушительный), который вода оказывала на задержку зажигания, и отбрасывал любую систему с достаточно большим содержанием воды. К тому же смесь была нестабильной, так что он сменил курс и начал работать в направлении смешанной кислоты. Им уже была опробована нитрозилсерная кислота NOHSO_4 и обнаружено, что она лучше снижала температуру, чем просто серная кислота, но это соединение было даже хуже в отношении выпадения осадка. Тогда он обратился с алкилсульфоновым кислотам, в особенности к метансульфоновой кислоте, и выяснил, что смесь 16 процентов её в БДАК замерзала всего лишь при -59°C , хотя при удаче она может быть значительно переохлаждена перед замерзанием. Всё это выглядело многообещающим и давало хорошее воспламенение с топливами, рассматриваемыми на тот момент. Её коррозионное воздействие было такое же (или слегка меньше), как и у БДАК или обыкновенной смешанной кислоты, но она имела одно блестящее достоинство, состоявшее в том, что не выпадало никакого осадка. Подобного рода смешанная кислота была исследована в North American Aviation примерно в то же самое время (1953 год). Они использовали фторсульфоновую кислоту вместо метансульфоновой, и большинство её свойств было очень похоже на другие смеси. Но к этому моменту это уже никого не волновало.

При этом многие более интересовались скорее задержкой зажигания БДАК, чем её точкой замерзания, и собирались опробовать самую безводную из доступных кислот для выяснения влияния воды на данную задержку. Подразделение General Chemical компании Allied Chemical and Dye Co. могли (и должны были) оказать эту небольшую услугу. Несомненно, что одна из их кислот всё еще была необычным образом эффективна, и оказалось, что она содержала менее одного процента воды. При наличии специального заказа вы можете получить это соединение в 50-литровой стеклянной емкости, размещенной в защитном алюминиевом кожухе. По получении было рекомендовано хранение бутылки в холодном ящике – и чем холоднее, тем лучше – для замедления разложения кислоты.

Работа с указанной «безводной» кислотой исключила все оставшиеся сомнения в том, что задержка зажигания БДАК критически и всецело зависит от содержания воды. Всё остальное не имело особого значения.

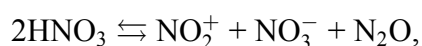
С болезненной ясностью стало понятно, что нужно было знать количество воды в кислоте перед заправкой её в ракету и нажатием пусковой кнопки без аварии. И в равной степени было очевидно, что установка лаборатории аналитической химии в местах эксплуатации не была практичной идеей. Так что раздался громкий клич для «полевого метода» анализа азотной кислоты. Что же потребители желали, так это небольшой чёрный ящик, в который бы помещался интересующий образец кислоты (или, что было предпочтительнее, на который этот ящик бы навешивался) и на котором загорался бы зеленый свет в случае подходящей для использования кислоты и красный в противоположном случае.

Небольшой чёрный ящик не был чем-то легким в создании, но два человека попытались изобрести такое устройство.

Первым был доктор Л. Уайт из Southern Research Institute, работавший на ВВС. Его идея была проста и прямолинейна. Вода, растворенная в азотной кислоте, имела линию поглощения в близком инфракрасном спектре. Вы всего лишь просвечиваете ваш образец инфракрасным лучом с определенной длиной волны, измеряете поглощение и получаете результат (еще одна полоса поглощения инфракрасного света могла быть использована для измерения содержания N_2O_4). Ясно, просто – и любой ракетный механик может это сделать.

Но данный подход не заработал должным образом. Имелись ожидаемые сложности (хотя и их масштаб недооценивался), что произрастали из коррозионной природы кислоты и её паров, замечательным образом пожиривших черный ящик. Но затем возникло нечто, что приводило в замешательство гораздо сильнее. Уайт должен был получить образец кислоты, которая, по крайней мере по его словам, была совершенно безводной, и линия поглощения инфракрасного излучения всё ещё присутствовала во всей красе, будучи в два раза шире естественного значения. Азотная кислота оказалась гораздо более сложной субстанцией, чем большинство людей думало.

Вот что происходит. Возьмём 100 процентную азотную кислоту – чистый нитрат водорода (не будем вдаваться в подробности получения указанного соединения). Оно является HNO_3 и больше ничем? Ничего подобного, исследования Инголда и Хьюза из Dunning наряду с другими в 30-ых и 40-ых годах показали, что имеет место равновесная реакция



так что наличествует некоторое – не слишком большое, но тем не менее – количество «особого вида» молекул воды даже в совершенно безводной кислоте. Так что соотношение между «аналитической» водой, в который состоял интерес, и оптическим поглощением не является линейным, и необходимо проанализировать дюжину образцов кислоты для получения калибровочной кривой. Над калибровочной сгустились тучи.

В NARTS во время работы на ВМФ я занимался постройкой другого чёрного ящика, мой метод базировался на электрической проводимости кислоты. Если взять чистую воду и начать добавлять к ней кислоту, начинают происходить странные вещи. Вначале проводимость растёт начиная с практически нулевого значения для чистой воды до широкого максимума в районе 33-процентной кислоты. Затем она отклоняется, достигая минимума при концентрации кислоты около 97,5 процентов, и затем вырастая снова и продолжая увеличиваться при достижении 100-процентной HNO_3 . Для ещё большего запутывания ситуации, присутствие N_2O_4 в кислоте тоже изменяет проводимость, поскольку N_2O_4 частично ионизируется на NO^+ и NO_3^+ .

После некоторого поиска наощупь весной 1951 года я принял следующий подход: образцы кислоты следует разделить на три части. Часть 1 оставалась нетронутой, для части 2 добавлялось небольшое количество воды в виде 2,5 куб.см. на 50 куб.см. кислоты. Часть 3 была разведена сильнее, 30 куб.см. воды на 10 куб.см. кислоты. Затем я измерил проводимость всех трех частей и построил два соотношения: проводимость 1:проводимость 2 и проводимость 2:проводимость 3 (принимая во внимание эти соотношения, сокращается константа ячейки проводимости и уменьшается эффект колебаний температуры). Содержание воды и N_2O_4 в кислоте теперь могло быть, в принципе, выведено из указанных двух соотношений. *После*, конечно же, метод был откалиброван путем измерения проводимости 150 или что-то около того образцов кислоты с различными, но известными составами.

И каким же образом вы собираетесь узнать состав кислоты? Разумеется, путём её анализа. Так что для создателей чёрных ящиков было полной неожиданностью узнать, что никто не может проанализировать азотную кислоту достаточно аккуратно для калибровки полевых методов.

Разумеется, калибровочный метод должен был быть точнее калибруемого – и никто не мог определить содержание азотной кислоты на регулярной основе с точностью до одной десятой процента. Случай N_2O_4 был простым – тетрирование с сернокислым церием происходило быстро и аккуратно, но не существовало прямого метода для нахождения содержания воды. Нужно было определить общее количество кислоты (HNO_3 плюс N_2O_4) и затем найти N_2O_4 , а потом получить количество воды по их разнице – причем малой между двумя большими количествами.

Предположим, что ваш анализ показал, что имеется 0,76 процента N_2O_4 и 99,2 процента (плюс или минус 0,2 процента) азотной кислоты (и вы были бы отличным парнем, если бы могли быть уверены в кислоте с точностью в 0,2 процента!), и затем каким бы было содержание воды? 0,04 процента? Минус 0,16 процента? 0,24 процента? Можно было сделать собственный выбор – и каждый бы имел право на жизнь.

Множество попыток, и все неудачные, были сделаны для нахождения прямого метода определения количества воды, но я решил использовать грубую силу и бескомпромиссно нацелился на настройку классического метода до тех пор, пока он не станет пригодным для калибровки полевых методов. Каждый заслуживающий внимания источник ошибок был исследован – и было удивительно узнать, какими же различными способами классическое титрование на основе кислоты может приводить к неправильным результатам. Никто не мог поверить в это до того момента, как выучил на своем горьком опыте, что когда готовится до 18 литров обыкновенной 1,4 NaOH, то необходимо смешивать раствор около часа для того, чтобы быть уверенным, что степень неоднородности всего объёма будет не выше, чем 1 к 10000. И то же самое можно сказать про тот факт, что когда воздух проникал в сосуд с хранимым раствором, то он должен был быть выдавлен из жидкости. И если этого не сделать, то влага в воздухе лаборатории разбавит верхний слой NaOH и приведёт к неправильным результатам. А также то, что когда будет получено окончательное фенолфталеиновое соединение с вашей 1,4 N щёлочью, рекомендуется провести обратное титрование с 0,1 N HCl (подавая каплю за каплей) до тех пор, пока розовый цвет не станет едва различим. Но все эти предосторожности и тонкости необходимы, если только вы нуждаетесь в результатах, которым сможете доверять.

Самым важным усовершенствованием было использование специально изготовленной точной бюретки, термостатированной и хранимой при 25° (коэффициент расширения 1,4 N NaOH *не* был хорошо известен, и даже если бы это было не так, кто-то бы точно использовал его неправильно!). Бюретки были изготовлены для меня компанией Emil Greiner Co. и стоили налогоплательщикам выброшенных семидесяти долларов. Они настолько хорошо работали, что некие другие агентства получили достойную сожаления привычку к одалживанию их у меня и последующему невозврату.²

Эта работа заняла почти целый год, но когда она была завершена, вода в кислоте могла быть определена с *точностью* в 0,025 процента. И точный анализ занимал не больше времени, чем грубый за год до этого.

После этого калибровка полетела подобно лёгкому ветерку, усложнённая разве что проблемами, вставшими при получении абсолютно безводной кислоты. Классический путь изготовления данной субстанции состоял в перемешивании P_2O_5 с БДАК, и затем дистилляции сухой кислоты при вакууме. Это было чертовски надоедливо – три часа работы могли дать вам 10 куб.см. безводной кислоты – а в нашем случае нужен был литр. Так что мы сфокусировались на простом методе, который не требовал усилий или какого-либо внимания. Нами было залито в большой сосуд около двух литров 100 процентной серной кислоты, и, затем, в три раза больше БДАК. После этого, выдерживая сосуд при 40°, мы продували сухой воздух через смесь и пытались сконденсировать максимально возможное количество кислоты из выпариваемой смеси. Запустив устройство вечером, на следующее утро мы получали один или два литра прозрачной как вода кислоты (весь N_2O_4 был удален), ожидавшей хранения в глубоко охлажденном состоянии. Это позволяло проводить анализ кислоты с концентраций от 99,8 процента вплоть до

² Не будем называть имён, но Господь покарает доктора Харриса из WADC!

100 процентов – последняя, конечно же, содержала избыток N_2O_5 . Данный метод был ужасно неэффективен – при перегонке терялось две трети кислоты – но для соединения стоимостью девять центов за фунт это никого не беспокоило.

Доктор Уайт опубликовал разработанный им полный оптический метод для воды и N_2O_4 в конце 1951 года, и я опубликовал свой метод проводимости девять месяцев спустя.³ Оба чёрных ящика отлично работали, и затем, естественно, все потеряли интерес к БДАК.

Было несколько других аналитических проблем, связанных с азотной кислотой и проясненных примерно в то же самое время. Доктор Харрис из WADC создал замечательный хранитель образцов для КДАК из стекла и тефлона, который предотвращал любые потери N_2O_4 при разбавлении кислоты перед титрованием, позволяя проведение анализа с точностью, равной таковой для БДАК. А мною были придуманы способы анализа как для смешанной кислоты, так и для смеси Майка Пино, состоявшей из БДАК и метансульфокислоты. Они стоят упоминания только в отношении демонстрации странных уловок, которые мы были вынуждены применить для достижения нужного результата. В обоих случаях N_2O_4 и общее количество кислоты было определено точно таким же способом, как и для усовершенствованного анализа БДАК, и одной только лишь проблемой было определение добавленной кислоты. В случае смешанной кислоты основная часть азотной кислоты в образце была нейтрализована формальдегидом, и вся образовавшаяся муравьиная кислота реагировала с метанолом и испарялась в виде метилформиата (выделяемые пары постоянно воспламенялись и сгорали с впечатляющим голубым пламенем). Всё, что после этого оставалось, помещалось в кипящую смесь воды и н-пропанола, и кондуктометрически титрировалось с ацетатом бария. Это кажется странной процедурой, но работало замечательно и выдавало настолько хорошие результаты, что лучше нельзя было и пожелать. Для смеси Майка Пино должен был применяться другой подход. Азотная кислота уничтожалась путем реакции с тёплой муравьиной кислотой, и остаток потенциометрически титрировался с ацетатом натрия до уксусной кислоты в среде безводной уксусной кислоты. Один электрод был обыкновенным стеклянным, используемым для определения уровня кислотности pH, другой был модифицированным каломельный электродом, использующим уксусную кислоту, насыщенную хлоридом лития. И снова получился необычный, но эффективный анализ. И как только эти методы были отработаны, все прекратили использовать и смешанную кислоту тоже!

Во многих отношениях N_2O_4 был более привлекателен в качестве окислителя, чем азотная кислота. Его эффективность была слегка выше, он не имел слишком много проблем с коррозией. Основным недостатком, конечно же, была его точка замерзания, и несколько организаций попытались что-то с ней сделать. Основным кандидатом на роль добавки для уменьшения температуры замерзания был оксид азота NO. Ещё в 1905 году Витторф исследовал фазовое поведение смеси, также как и Бауме и Робертс in 1919 году. Но давление паров смеси NO и N_2O_4 было

³Ещё через 16 месяцев в 1954 году Дейв Мэйсон и его коллеги в ЛРД, описали ещё один кондуктометрический метод, который мог быть применен как к БДАК, так и к КДАК. Были выполнены два измерения проводимости, оба при 0°C, одно для чистой кислоты и другое для кислоты, насыщенной KNO_3 . Исходя из этих двух измерений, содержание N_2O_4 и H_2O может быть выведено путём использования калибровочной диаграммы.

выше, чем у простого тетраоксида азота, и несколько оптимистов попробовали найти добавку, уменьшающую точку замерзания без увеличения давления паров. Это оказалось довольно легко сделать – но при неприемлемой цене. В 1948 году Л.Д. Коул из ЛРД опробовал вещи такого рода, как нитробензол и динитробензол, пикриновую кислоту и метилнитрат и обнаружил при исследовании смесей, что в его руках находились чрезвычайно чувствительные и капризные мощные взрывчатые вещества. Три года спустя Т. Л. Томсон из North American опробовал нитрометан, нитроэтан и нитропропан и сделал такое же открытие. В 1953 году Коллинс, Льюис и Шечтер из Callery Chemical Co. опробовали нитроалканы наряду с тетранитрометаном и определили тройную фазовую диаграмму для тетраоксида азота, нитрометана и тринитрометана⁴. И снова получились мощные взрывчатки. Примерно в это же самое время С. Бурке из Аэроджет сделал следующий важный шаг и исследовал не только указанные вещества, но и печально известный тринитрометан плюс диэтилкарбонат, диэтилоксалат и диэтилцеллозольв. И его смеси также были настоящими катастрофами, только и ищущими место, где произойти. Оказалось, что единственным соединением, которое могло быть безопасно растворено в оксиде азота, был сам оксид азота.

В 1951 году Т.Л. Томсон опробовал закись азота и отметил, что она не была хорошо растворима в N_2O_4 , что было подтверждено У.У. Рокером из Дюпон. Так что оставалась только окись азота.⁵

NO чрезвычайно эффективен для снижения температуры замерзания N_2O_4 и соединяется с последним под давлением или при низкой температуре, образуя N_2O_3 , так что эвтектика располагается между чистым N_2O_4 и соединением, соответствующими N_2O_3 таким образом, что малая добавка NO оказывает необычно большой эффект на точку замерзания. Л.Р. Мейкпис с коллегами из NOTS смогли показать в 1948 году, что 25 процентов NO снизит точку замерзания тетраоксида азота ниже требуемых $-65^{\circ}F$, или $-54^{\circ}C$, а добавка 30 процентов уменьшает температуру до значения ниже магических $-100^{\circ}F$, или $-73^{\circ}C$. Однако давление паров последней смеси при $160^{\circ}F$, или $71^{\circ}C$, было неприемлемо высоким и составляло около 300 фунтов на квадратный дюйм, или более 20 атмосфер. Несколько исследователей, включая Т.Л. Томсона из North American и Т.Д. Макнигла из, предположительно, Nitrogen Division of Allied Chemical and Dye Co., изучили систему, но определённые результаты пришли из ЛРД и NOTS.

Между 1950 и 1954 годами Уиттакер, Спраг и Скольник со своей группой в NOTS, и Б.Х. Сэйж с коллегами в ЛРД исследовали систему тетраоксид азота-окись азота с такой тщательностью, что не осталось ничего, стоящего усилий, потраченных на дополнительное изучение. Их дотошные работы принесла плоды годы спустя, когда была разработана ракета Титан II с N_2O_4 в качестве окислителя.

Несколько агентств опробовали смешанные оксиды азота (MON-25 или MON-30 или что-то подобного рода с номером, обозначающим процентное содержание NO в смеси) с различными топливами и обнаружили, что было сложнее получить хорошую эффективность (высокий процент от теоретической производительно-

⁴Прим. перев. Известного также как нитроформ.

⁵В 1948 году Коул из ЛРД отметил, что смесь 41,5 процента N_2O и оставшегося N_2O_4 замерзала при $-51^{\circ}C$ и кипела при $33^{\circ}C$. Эти значения настолько противоречили опыту всех остальных, что они остаются необъяснимыми.

сти) с MON, чем с чистым тетраоксидом азота. По всей видимости, большая кинетическая стабильность NO замедляла реакцию горения. По этой причине, а также ввиду высокого давления паров, исследователи отвернулись от MON на несколько лет (некоторые космические ракеты на сегодня используют MON-10).⁶

И на это была ещё одна причина – КДАК была укрощена. Два события привели к данному результату: серия детальных исследований в Ohio State University и ЛРД, решивших задачу разложения и увеличения давления, а также совершенно неожиданный прорыв в NARTS, снизивший степень коррозии до пренебрежимого значения. С указанными решенными проблемами кислота могла быть «упакована» или залита в ракету на заводе, так что обслуживающему персоналу не пришлось бы иметь с ней дело. И это привело к исчезновению сложностей со всеми её токсичными парами и опасностью получения ожогов.

К началу 1951 года структура и поведение азотной кислоты стали ясными. В действительности это была чертовски сложная система – едва ли можно было бы её назвать субстанцией – но некоторые выводы могли быть сделаны. Основопологающая работа профессора С.К. Инголда и его коллег, опубликованная в серии статей в 1950 году, прояснила равновесие, существовавшее между различными элементами системы, и Франк и Ширмер в Германии в том же году объяснили механизм разложения. Если коротко, то вот что было показано в их работах.

Прежде всего, в очень сильной азотной кислоте имеет место равновесие:



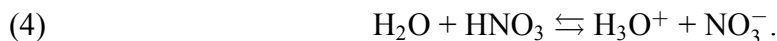
Однако концентрация H_2NO_3^+ чрезвычайно мала в каждый момент времени в силу того, что также имеет место равновесное состояние



так что для практических целей можно записать, что



и игнорировать H_2NO_3^+ . В разбавленной кислоте равновесное состояние описывается как:



Таким образом, в кислоте, содержащей меньше 2,5 процентов воды, NO_2^+ является главным катионом, и в кислоте с большим количеством воды эту роль играет H_3O^+ . Если же мы имеем точно 2,5 процента воды, то присутствует очень небольшое количество из указанных катионов, что является чрезвычайно элегантным объяснением минимальной электропроводности, замеченной на этом уровне. Если NO_2^+ является активным окисляющим ионом в сильной кислоте (и при некоторых исследованиях коррозии, сделанных в течение пары лет, мне удалось это

⁶Также недавно был разработан «зеленый» N_2O_4 , содержащий около 0,6% NO и дающий указанный цвет на просвет. Похоже, что NO снижает степень коррозии под напряжением у титана, а также удаляет кислород, растворённый в N_2O_4 .

доказать), то эффект воды, оказанный на задержку зажигания, становится очевидным. Уравнение (3) показывает, что добавление воды к безводной кислоте уменьшит концентрацию NO_2^+ , являющегося активным агентом. Добавление NO_3^- произведет тот же эффект – что объясняет плохое сгорание с кислотой, содержащей NH_4NO_3 .

Азотистый ион (NO_2^+) вполне естественным путём будет притягиваться к отрицательно заряженной стороне молекулы горючего, такой как двойная или тройная связь с концентрацией электронов – что глубоко объясняет замечание Луи Раппа о желательности множественных связей для уменьшения задержки зажигания.

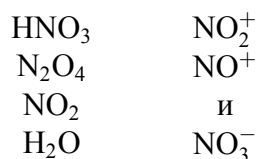
Ион (NO_2^+) также объясняет нестабильность нитритов в сильной кислоте путем реакции:



Если N_2O_4 присутствует в сильной кислоте, появляется ещё один набор равновесий:



В результате всего этого (даже пренебрегая сольватацией) в сильной кислоте, содержащей N_2O_4 , имеется достаточное количество по крайней мере семи субстанций:



плюс следовые количества N_3O^+ и H_2NO_3^+ , причём всё в взаимосвязанном равновесном состоянии. Но это не объясняло рост давления. Азотная кислота разлагается в основном путём реакции



Но каким образом это происходит? Ну, Франк и Шрирмер показали, что имеется еще одно равновесное состояние в системе и ещё один набор компонент:



И N_2O_5 хорошо известен своей нестабильностью и разложением путём реакции



Затем, в силу очевидной нерастворимости O_2 в азотной кислоте, он выходит наружу из жидкости, давление вырастает, и ваша кислота окрашивается в красный цвет за счет NO_2 .

Что же с этим можно поделать? Имеют место два подхода. Очевидный подсказывается уравнением (6): увеличить концентрацию (или, в случае кислорода, давление) элементов из правой части уравнения, и сместить равновесие в обратном

направлении. Быстро стало ясно, что простое добавление кислородной подушки над вашей БДАК не помогает, равновесное давление кислорода было слишком высоким для этого. Я на самом деле видел вставшие дыбом от ужаса волосы ракетных механиков, пытавшихся определить давление кислорода, образовавшегося при разложении БДАК, путем измерения степени раздутия баков – и дрожавших от этого зрелища. Равновесное давление кислорода над 100-процентной кислотой при нулевом незаполненном объеме (отсутствии значительного пустого пространства в баке) при 160°F, или 71°C, оказалось равным 70 атмосферам, и никто не хотел работать с такого рода бомбой.

Для уменьшения равновесного давления кислорода вы очевидным образом должны увеличить N_2O_4 или концентрацию воды, или и то, и другое сразу. При этом БДАК и безводная кислота явно были вне игры.

Теми, кто предпринял и выполнил героическую задачу нахождения фазового поведения и равновесного давления смеси азотная кислота- N_2O_4 - H_2O во всем интересующем диапазоне компонент и температур (до 50% N_2O_4 и до 10 процентов или около того H_2O – и от комнатной температуры до 120°C), были Д.М. Мэйсон и его команда из ЛРД, а также Кау и его группа в Университете Штата Огайо. К тому моменту, когда эти группы завершили свою работу (все результаты были опубликованы к 1955 году), уже не оставалось ничего более, стоящего упоминания касательно азотной кислоты. Термодинамика, разложение, ионетика, фазовые свойства, особенности транспортировки и выполняемые работы. Принимая во внимание сложности, имеющие место при работе с такой скверной субстанцией, данное достижение может быть честно описано как героическое.

И оно стоило того. КДАК могла быть приготовлена с вполне удовлетворительным давлением (значительно меньше 100 футов на квадратный дюйм, или 6,8 атмосфер) даже при 160°F (71°C). Компания General Chemical Co. вышла с кислотой, содержащей 23% N_2O_4 и 2% H_2O , в то время как смесь ЛРД, названная ими SFMA (от английского сокращения Stable Fuming Nitric Acid, или стабильная дымящая азотная кислота), содержала 14 и 2,5 процента соответственно.

Точки замерзания смеси HNO_3 - N_2O_4 - H_2O были быстро найдены для широкого диапазона значений. Р.О. Миллер из LFPL, Д.У. Элверум из ЛРД, Джек Гордон из WADC, а также многие другие были вовлечены в эту работу, завершенную к 1955 году.

Эти результаты не были блестящи в смысле согласованности значений (смеси часто переохлаждены, и как я уже отмечал выше, КДАК не самая простая штука в мире для анализа), но было показано, что как смесь General Chemical Co., так и SFNA от ЛРД обе замерзают при температуре ниже -65°F, или -54°C. В примерно это же самое время ВМФ решило расслабиться, удовлетвориться указанной цифрой и отказаться от своего требования загадочной цифры -100°F, или -73°C, что позволило всем в округе выдохнуть с облегчением. Одной задачей меньше!

Решение проблемы коррозии оказалось простым, как только мы обдумали задачу. Весной 1951 года в NARTS мы были озадачены и изучали коррозию нержавеющей стали типа 18-8, в особенности SS-347, под воздействием БДАК. Эрик Рау, работавший со мной только в течение нескольких месяцев (химическая лаборатория начала функционировать лишь с предыдущего лета) полагал, что фторидное покрытие стали может защитить от воздействия кислоты (и не спраши-

вайте меня, с чего он так решил!). Так что он поговорил с другом, работавшим на подразделение компании Allied Chemical and Dye под названием General Chemical Co., о размещении некоторых наших образцов для полосок 347-ой стали в течение нескольких дней в трубопроводах, что перекачивали HF от одной части фабрики к другой. Затем Эрик проверил данные образцы на устойчивость к коррозии и обнаружил, что они разрушались так же сильно, как и необработанная сталь. Но данная коррозия была отложенной и не начиналась, пока не проходил день или два. Вывод состоял в том, что (1) фторидное покрытие защищает, но (2) работает оно в БДАК недолго. Затем он подумал, что возможно сделать покрытие восстанавливающимся путем добавления некоторого количества HF в БДАК. Но только лишь доступным нам в лаборатории HF был обыкновенный 50-процентный водный раствор кислоты, и Эрик не хотел добавлять никакой воды к своей БДАК. Так что я предложил ему попробовать бифторид аммония $\text{NH}_4\text{F} \cdot \text{HF}$, который в любом случае больше чем на две трети состоит из HF, с ним гораздо легче иметь дело и, кроме того, он стоял у нас на полке. Эрик опробовал это соединение, и, к нашему невероятному удивлению, оно работало, причем с эффективностью, превосходящей самые несбыточные ожидания. Несколько недель возни показали нам, что 0,5 процента HF в кислоте, неважно каким образом введенной, снижает скорость коррозии стали на порядок и более, и значения выше 0,5 процента не вызывают измеримого улучшения. Мы описали наши находки в квартальном отчете 1 июля 1951 года, но NARTS-у на тот момент едва исполнилось два года, и едва ли кто-то читал данные доклады.

Но с 10 по 12 октября в Пентагоне проходила конференция, посвященная проблемам азотной кислоты и принявшая около 150 представителей промышленности, правительства и обслуживающих подразделений, занимавшихся топливными вопросами. Я туда прибыл, как и доктор Милтон Шир («Дядя Милти») из нашей группы, сделавший доклад об открытии Эрика в середине дня 11-го числа. Это событие стало замечательным (для нас) по причине того факта, что в тоже самое утро в ходе обсуждения другой работы Р.У. Гринвуд из Bell Aircraft отметил, что он опробовал бифторид аммония в качестве добавки для снижения температуры замерзания БДАК, а затем, спустя три доклада, Т.Л. Томпсон из North American Aviation рассказал об использовании как безводной плавиковой кислоты, так и водного раствора HF в качестве средства снижения точки замерзания КДАК. И они оба совершенно пропустили эффект ингибирования коррозии!

И затем все начали действовать – North American, ЛРД, да и практически все остальные (мы уже входили в это число). Как выяснилось, HF была даже более эффективна для подавления коррозии алюминия, чем для снижения таковой у SS-347: ингибирование было одинаково сильно как для КДАК, так и БДАК и было эффективно не только в жидкой, но и газообразной фазе, где металл встречался с парами кислоты над уровнем жидкости.

Но хотя HF и была хорошим ингибитором для алюминия и нержавеющей стали 18-8, эта кислота не была одинаково эффективной. Она не оказывала особого эффекта на коррозию никеля или хрома, в то же самое время *увеличивая* скорость коррозии для тантала в 2000 раз и для титана в 8000 раз.

В то время существовала большая заинтересованность в титане, и поскольку многие инженеры-ракетчики хотели его использовать, нельзя было пренебречь

вопросом его устойчивости к КДАК. Но данные исследования коррозии были прерваны совершенно неожиданным инцидентом. 29 декабря 1953 года техник военно-воздушной базы Эдвардс исследовал набор образцов титана, погруженных в КДАК, когда, совершенно без всякого предупреждения, один из них или сразу несколько сдетонировали, с силой отбросив парня и обрызгав его кислотой и разлетающимся стеклом, и заполнив комнату NO_2 . Техник, возможно, к счастью для него, умер от асфиксии, не приходя в сознание.

Как и следовало ожидать, имела место ужасная шумиха, и ЛРД предприняла усилия для того, чтобы разобраться в причинах происшествия. Д.Б. Риттенхаус и его сотрудники отследили цепочку фактов, и к 1956 году им всё стало весьма ясным. Первоначальная межзерновая коррозия производит мелкий черный порошок металлического (в основном) титана. И он, будучи смоченным азотной кислотой, был чувствителен как нитроглицерин или гремучая ртуть (управляющей реакцией, конечно же, было образование TiO_2). Не все титановые сплавы вели себя подобным образом, но достаточное количество их не годилось для хранения годами в какой-нибудь собачьей конуре к вящему беспокойству людей, занимавшихся топливами.

Но несмотря на происшествие с титаном, ракетная индустрия теперь имела пригодную для использования азотную кислоту и переписывание военных спецификаций для БДАК и КДАК выглядело разумным.

Затем в течение 1954 года группа представителей обслуживающих подразделений и промышленности собрались вместе при финансировании, предоставленном ВВС, для того, чтобы заняться такими спецификациями, и я там присутствовал в качестве одного из людей со стороны ВМФ.

Некоторые пользователи все ещё продолжали аргументировать за сравнительно удачную 14 и 22 процентную КДАК, и некоторым по-прежнему нравилась БДАК. Химическая индустрия была согласна работать с любой кислотой – «Чёрт возьми, это так просто произвести как один сорт кислоты, так и другой – просто скажите нам, что вам нужно». Так что мы решили написать одну спецификацию, осчастливившую всех сразу. Термины БДАК и КДАК были официально отброшены и не менее четырёх типов азотной кислоты было описано, которые мы совершенно тривиально обозвали «Азотная кислота, тип I, II, III и IV». Эти кислоты в порядке именованья содержали 0, 7, 14 и 21 процент N_2O_4 . Если вам нужно было ингибировать кислоту HF , вы запрашивали I-A или III-A или всё что угодно ещё, и ваша кислота содержала бы 0,6 процента HF .

Я был против описания типа ингибитора в открыто опубликованных спецификациях в силу того, что он являлся настолько невероятным (хотя и простым) трюком, что мог бы храниться в секрете некоторое время. У меня были друзья в сообществе разведки, и я просил их осторожно узнать, известно ли об данной уловке по другую сторону железного занавеса. Ответ был получен с замечательной быстротой и был отрицательным, и в действительности советское производство HF было проблемным, а начальник этого направления проводил отпуск в Сибири. Так что я громко и продолжительно протестовал, но ВВС правило балом и сделало, что хотело, и когда спецификации были опубликованы, секрет был удачно выболтан.

В спецификации были включены процедуры по анализу кислот. Они были

обычными, за исключением одной для HF, представлявшей из себя сложный и хитроумный оптический метод, включающий отбеливание циркониево-ализариновой краски ионами фтора. В моей собственной лаборатории я отказался иметь что-либо в этом методом и придумал простой – но не бесхитростный – тест, не требовавший каких-либо усилий или ума. Следовало залить одну часть кислоты и две части воды в полиэтиленовую мензурку и поместить туда взвешенную на магнитную палочку для размешивания в трубке из мягкого стекла. Затем вы оставляете всё для перемешивания в течение ночи и взвешиваете палочку снова. Если выбранный кусок стекла откалиброван с кислотой, содержащей известное количество HF, то это всё, что вам нужно с точностью, достаточно хорошей для практических целей.

Дейв Мэйсон из ЛРД выступил с ещё одним черновым методом для оценки количества плавиковой кислоты – почти таким же простым, как и мой, и при этом гораздо более быстрым. Это был коллометрический метод, основанный на отбеливающем эффекте иона фтора на пурпуровый салицилат железа.

Как оказалось, тип III-A постепенно взял верх над всеми остальными, и сейчас *он* рассматривается в качестве азотно-кислого окислителя.⁷ Инженеры называли его ИКДАК, и лишь немногие из нынешнего пополнения знали о том, что вообще имеется ещё один тип – или даже что означает термин «ингибированный». Несколько лет назад я видел так называемых инженеров-ракетчиков, наполнявших бак из нержавеющей стали КДАК *без* HF в её составе – и затем удивлявшихся, почему их кислота окрашивалась зелёным.

Единственной стоящей ещё одного упоминания кислотой является «азотная кислота максимальной плотности», предложенной Аэроджет для тех применений, где наиболее важна плотность, и требования к температуре замерзания не так сильны. Она содержит 44 процента N_2O_4 и имеет плотность 1,65. Как только кислота с удовлетворительными качествами была найдена, интерес к её анализу устремился к нулю. III-A гладко самовоспламенялась с НДМГ, небольшое количество воды более или менее не оказывало влияния, и если можно было хранить кислоту в запечатанном состоянии, когда она не впитывала воду, и при наличии плавиковой кислоты, оберегавшей от любого беспокойства касательно коррозии, то нечего было больше и желать. Какой-либо агент по закупкам мог теперь сделать анализ содержимого ёмкости, но в целом было достаточно иметь таковой от производителя, залить кислоту в ёмкость – и прожечь её. И это в самом деле работало.

Ситуация на сегодняшний день, таким образом, сложилась следующая: для тактических ракет, где температура замерзания топливных компонент имеет важное значение, ИКДАК типа III-A является окислителем. В качестве примера можно взять ракету Лэнс тягой в 21 тонну, чьим топливом служит НДМГ, а также Bullpor, сжигающую смесь НДМГ, DETA и ацетонитрила. В космическом пространстве замечательный своей надёжностью двигатель Аджены, произведенный Белл и имеющий тягу чуть более 7 тонн, также использует ИКДАК вместе с НДМГ.

Для стратегических ракет, запускаемых из укреплённых – и подогреваемых –

⁷Только один важный двигатель для вторых ступеней Авангарда и Тора использовал кислоту типа I-A (ИБДАК) для сжигания НДМГ.

позиций, N_2O_4 с его слегка более высокой эффективностью используется в качестве окислителя. Титан II является, конечно же, самой большой из МБР США, и его первая ступень приводится в движение двумя двигателя тягой в 97 тонн при помощи N_2O_4 и 50-50 смесью гидразина-НДМГ.

Множество других двигателей с N_2O_4 используются в космосе, начиная от основного двигателя Аполлона тягой 9,7 тонн, также с топливом 50-50, и заканчивая крохотными однофунтовыми двигателями системы контроля ориентации. Горючим неизменно являются гидразин или его смеси, и у пользователей имеются причины быть довольными эффективностью и надежностью данных установок.

Тоже самое можно сказать о химиках и инженерах, кому уже не придется заново проходить через всё вышеописанное.

Послесловие

Ещё один симпозиум по жидкому топливу прошел в Пентагоне 23 и 24 мая 1955 года. Если встреча в октябре 1951 года было в основном посвящена имеющимся сложностям, май 1955 года может быть описан в качестве серии проведенных сражений с последующей триумфальной победой.

Высочайшими точками были рассказы Бернарда Хорнштейна из ONR о разработке ММГ и НДМГ и С.П. Гринфилда из North American о превратностях создания NALAR.

NALAR была 70-миллиметровой ракетой BBC типа воздух-воздух с жесткими требованиями – жидкие компоненты должны были самовосламеняться и быть ампулизованы таким образом, что ракета могла храниться с течением 5 лет в состоянии готовности к запуску. И они должны были отрабатывать для любой температуры в диапазоне от $-65^{\circ}F$, или $-54^{\circ}C$, до $+165^{\circ}F$, или $+74^{\circ}C$. North American начала разработку в июле 1950 года.

Первым окислителем была КДАК с 18% N_2O_4 . С самого начала пришлось бороться с повышением давления и коррозией. Однако, пытаясь получить хорошее зажигание и гладкое сгорание, этот окислитель был прожжен с:

	скипидаром
и	декалином
и	2-нитропропаном плюс 10-20% скипидара
и	изопропанолом
и	этанолом
и	бутилмеркаптаном
и	толуолом
и	алкиловым трифосфитом
и	ничего не вышло

После этого они сместились в сторону MON-30 для окислителя, 70% N_2O_4 , 30% NO и продолжили свой поход за мягким зажиганием и горением с:

	скипидаром
и	бутилмеркаптаном
и	гидразином
и	изопропанолом

- и толуолом
- и 2-метилфураном
- и метанолом
- и авиационным бензином
- и скипидаром плюс 20-30% 2-метилфурана
- и бутил меркаптаном плюс 20-30% 2-метилфурана
- и изонопрополом плюс 30% скипидара
- и метанолом плюс 20-25% 2-метилфурана
- и метанолом плюс 30-40% гидразина
- и алкиловым тиофосфитом
- и скипидаром плюс алкиловым тиофосфитом
- и JP-4 плюс алкиловый тиофосфит
- и JP-4 плюс 10-30% ксилидина
- и получили серию жёстких стартов, за которыми обычно имело место неустойчивое горение.

К этому времени наступила весна 1953 года, и инженеры узнали об использовании HF в качестве ингибитора коррозии для азотной кислоты (тот факт, что данный эффект был открыт за два года до этого, и то, что химики North American работали с плавиковой кислотой по крайней мере уже год, позволяет предположить отсутствие чьего-то общения, или, возможно, инженеры попросту не читали чужих работ).

Как бы то ни было, они вернулись, возможно с чувством *déjà vu*, к скипидару и КДАК – но к этому моменту уже ингибированной. Для улучшения зажигания было добавлено до 20 процентов стандартного горючего 208, что было псевдонимом 2-метиламино-4-метил-1-3-2-диоксафосфолана, к скипидару. Затем ВВС, которые, как вы можете припомнить, платили за всё происходящее, предложили НДМГ в качестве замены для РГ-208. Что было сделано, и результаты были настолько хороши, что был произведен переход на чистый НДМГ, а скипидар отправлен в преисподнюю.

Для разработчиков переход к нынешней рабочей лошадке в виде комбинации НДМГ-ИКДАК занял четыре года, но в конце концов они достигли цели. И недавно ракета NALAR, хранившаяся в течение около двенадцати лет, была снята с полки и запущена – и она отработала. Гипергол и его подружка были захвачены и приручены (медленно исчезаем на фоне заката под звуки музыки).

Глава 5

Вечная подружка невесты перекись

Пероксид водорода может быть назван окислителем, которому так и не нашлось применения (по крайней мере, на данный момент). Не то чтобы никто не интересовался ей – это делалось как в США, так и даже в большей степени в Англии. Её эффективность с большинством горючих была близка к таковой у азотной кислоты, то же самое можно сказать и о плотности, и в некоторых аспектах она превосходила другие окислители. Во-первых, от неё не исходило токсичных паров, и она не сжигала кожу подобно азотной кислоте. Если вы пролили перекись и не отложили надолго её смывание, весь полученный вами ущерб заключался в стойком зуде и коже, отбелённой до цвета кости и оставшейся таковой до замены новой. Также перекись не оказывала коррозионного воздействия на металлы подобно кислоте.

Но (как обычно, в топливных делах имелось множество «но») точка замерзания 100-процентной H_2O_2 была только на полградуса ниже, чем у воды (разумеется, 85 или 90-процентная штука, которая была наиболее доступна в 40-ых, обладала лучшей температурой замерзания, но разбавление топливной компоненты инертной массой только ради улучшения точки замерзания не является процессом, интересным для парней в области реактивного движения!). И, наконец, пероксид был нестабильным.

Перекись водорода разлагается в соответствии с уравнение $\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2$ с выделение теплоты. Конечно же, БДАК тоже разлагается, но не экзотермически, и разница при этом критична, она означает, что разложение пероксида является самоускоряющимся. Представим, что у вас есть бак с пероксидом без эффективного способа отвода тепла, и ваша перекись начинает разлагаться по той или иной причине. При этом выделяется теплота, нагревающая остальной пероксид, который затем, естественно, начинается разлагаться быстрее – производя ещё больше тепла. И так всё идет быстрее и быстрее до тех пор, пока не получится значительный вжик или бум в зависимости от обстоятельств, распыляющий перегретый пар и горячий кислород по всей округе.

И сбивающее с толку количество веществ, перечисленных в порядке приоритета, может начать процесс разложения: большинство переходных металлов (Fe, Cu, Ag, Co и т.д.) и их соединения; многие органические соединения (пролив пероксида на шерстяной костюм может превратить обладателя сего в пылающий фа-

кел, подходящий для обустройства садов Нерона¹); обыкновенная грязь неясного состава и универсального происхождения; ионы ОН. Взяв случайным образом название субстанции, с вероятностью 50 на 50 (или даже лучше) можно получить катализатор разложения перекиси.

Для примера, имелись некоторые соединения (станнаты и фосфаты), которые могли бы быть добавлены в следовых количествах и немного стабилизировали перекись путем устранения некоторых ионов из обращения, но полезность и возможности данных добавок были сильно ограничены, также они создавали проблемы, если вы *собирались* получить каталитическое разложение. Единственным способом было хранение пероксида в баке, изготовленном из чего-либо, что не катализировало разложение (наилучшим выбором являлся чистый алюминий) и содержание бака в чистоте. Требуемая чистота должна была быть не просто стерильной, как в операционной, а практически трансцендентной. Всего лишь приготовление алюминиевого бака для хранения перекиси вырастала в целую историю и увлекательное времяпрепровождение, занимающее несколько дней. Очистка, промывание алканом, промывка кислотой, осушка, пассивирование разбавленной перекисью – всё это продолжалась и продолжалось. И даже при удачном завершении, пероксид всё еще медленно разлагался – не слишком быстро для начала неконтролируемой цепной реакции, но достаточно активно для увеличения давления кислорода в запечатанном баке и невозможности его хранения. И в качестве душераздирающего опыта можно было приложить ухо к баку с окислителем и выслушать звук «глуб» снова и снова после длинной паузы. После такого опыта многие люди, включая, в частности, и меня самого, склонялись к скептической точке зрения на пероксид и обходили его стороной.

Итак, в начале 1945 года мы наложили лапу на большое количество немецкой перекиси с концентрацией в 80-85 процентов, и часть её была отправлена в Англию. Британцы были очень заинтересованы в ней и немецком производственном процессе. В том же году они прожгли двигатель, используя перманганат кальция для разложения пероксида и фурфурол в качестве горючего, и в течение нескольких лет работали с перекисью и различными (в основном, углеводородными) горючими.

Оставшиеся запасы перекиси прибыли в Соединённые Штаты. Однако этот пероксид содержал значительное количество оловянноокислого натрия (в качестве стабилизатора) и не слишком подходил для экспериментальной работы. Так что ВМФ заключило сделку с Buffalo Electrochemical Co., которое только что развернуло промышленное производство высококонцентрированной перекиси. Флот отдал большинство немецкого пероксида этой компании, которая развела его до 2 или 4-процентного ополоскивателя для рта или отбеливателя волос (где стабилизатор играл положительную роль), а взамен передала ВМФ эквивалентное количество нового 90-процентного состава без какого-либо стабилизатора. И после этого ВМФ распределил данную перекись среди различных работников для «боевого» использования.

ЛРД была одним из первых агентств в нашей стране, серьёзно присмотревшимся к пероксиду. С конца 1944 и до 1948 года они опробовали, используя пе-

¹Прим. перев. Автор имеет в виду античные гонения на христиан при римском императоре Нероне, которых заживо сжигали с целью освещения императорских садов.

рекись концентрацией от 87 до 100 процентов, множество различных горючих, включая метанол, керосин, гидразин и диамин этилена. Только гидразин самовосламенялся с перекисью, все остальные комбинации должны были поджигаться при помощи пиротехнического инициатора. Одна очень странная комбинация, исследованная ими в течение указанной периода времени, состояла из пероксида и нитрометана, как чистого, так и с 35 процентами нитроэтана или 30 процентами метанола. Одной странностью было очень низкое соотношение окислителя и горючего, варьировавшегося от 0,1 до 0,5 или что-то около того (с гидразином в качестве горючего данное соотношение должно быть около 2,0! Большое содержание кислорода в горючем объясняет низкое значение соотношения окислитель/горючее).

Другие агентства, включая MIT, GE и M. W. Kellogg Co., прожгли пероксид с гидразином в различных концентрациях – от 54 вплоть до 100 процентов, и Kellogg даже опробовал его с катализатором $K_3Cu(CN)_4$ в гидразине подобно немцам до этого.

В целом, все получили с пероксидом стоящую внимания эффективность, хотя и имелись некоторые затруднения с зажиганием и стабильностью сгорания, но точка замерзания была серьёзной проблемой, и большинство организаций потеряли интерес к данному окислителю.

Все, кроме ВМФ. Как раз в это самое время адмиралы прыгали и кричали, отказываясь от обедов, сервированных золотом, от одной только мысли о присутствии азотной кислоты на борту их возлюбленных авианосцев. У них также упорно чесались пятки с того самого дня, как им впервые была предложена мысль, что пар может быть предпочтительнее для перемещения линкора из точки А в точку Б.

Так что NOTS был принужден к разработке «нетоксичной» топливной комбинации, базировавшейся на пероксиде водорода и реактивном горючем, причем с приемлемым поведением при низких температурах.

Было доступно множество информации в книжках, стоявшей прямо на полке. Маас и его коллеги в течение 20-ых исследовали пероксид водорода со всех сторон и растворили в нём всевозможные соединения, начиная от солей и вплоть до сахарозы. И многие из них отлично снижали температуру замерзания: 9,5 процента аммиака, к примеру, формировало эвтектику, замерзавшую при -40° , а смесь, содержавшая 59 процентов, замерзала при -54° (при промежуточном значении 33 процента соединение NH_4OON плавилось при -25°). И раствор, содержавший 45 процентов метанола, замерзал при -40° . Данные смеси, однако, имели один, так сказать, изысканный недостаток – они были очень чувствительны и представляли собой мощную взрывчатку.

Британцы, как это было уже отмечено, очень интересовались перекисью, и Вайзмэн из ERDE (Explosives Research and Development Establishment), находящегося в Waltham Abbey, указал в 1948 году, что нитрат аммония хорошо снижал температуру замерзания и не превращал пероксид в сильную взрывчатку. Так что NOTS (Дж.Р. Мэйкпис и Дж.М. Дайер) замерыли значительную часть схемы пероксид-нитрат аммония-вода и предложили смесь, незамерзавшую при температуре выше -54° . Она состояла из 55 процентов пероксида, 25 процентов нитрата аммония и 20 процентов воды. Эта смесь была удачно испытана с JP-1 в начале

1951 года, но полученная эффективность не впечатляла. Другая смесь перекись-нитрат аммония была прожжена NOTS, и, несколько позже, NARTS. В то же самое время, Л.В. Висниwski из Вессо добавил штуки вроде этиленгликоля, диэтиленгликоля и тетрагидрофурана к перекиси. Данные смеси были разработаны в качестве монотоплив, но они замерзали при -40° , и RMI опробовала их в качестве окислителей для бензина и JP-4 с посредственным результатом. RMI даже не могла воспламенить эти смеси при температуре ниже $+10^{\circ}$, к тому же, они были взрывоопасны.

В итоге, могли быть использованы только смеси с низкой точкой замерзания, содержащие нитрат аммония – и они имели серьёзные ограничения. Одним из них был тот факт, что добавление этого вещества в пероксид настолько увеличивало его нестабильность, что он с высокой вероятностью сдетонировал бы в форсунке и почти наверняка бы взрывался, разрушая двигатель, при попытке его использования для регенеративного охлаждения.

Зажигание системы с пероксидом водорода, особенно в случае горения с бензином или реактивным горючим, всегда было проблемой. В некоторых случаях раствор перманганата кальция был впрыснут для запуска вместе с горючим и топливом, но это было неуклюжее усложнение. В некоторых тестах (в MIT) небольшое количество катализатора (нитрата кобальта) было растворено в пероксиде, но это ухудшало стабильность. Горючим был керосин с несколькими процентами о-толуидина. Самовосламеняющийся или легко инициализирующийся стартовый инициатор (обычно гидразин, иногда содержащий катализатор) мог запустить процесс, кроме того, в некоторых случаях был использован мощный твердотопливный пиротехнический запал. Возможно, самой надежной, и, таким образом, безопасной техникой было разложение с катализатором части или всей перекиси в отдельном газогенераторе, подводящим полученные горячие продукты в главную камеру сгорания, и впрыск туда же топлива (и, если он был, оставшегося окислителя. При этом набор экранов, изготовленных из серебра, был эффективным массивом катализаторов). NARTS разработала и прожгла двигатель, у которого каталитическая камера входила в состав главной камеры сгорания.

Большинство работ с пероксидом, выполненных для ВМФ, были напрямую связаны не с ракетами, а с тем, что называлось «суперускорением» для реактивных самолётов – дополнительным ракетным ускорителем, который мог вступить в игру для выработки тяги с целью достижения очень высокой скорости – так что когда пилот обнаруживал шестерку Мигов, дышавших ему в затылок, он мог нажать аварийную кнопку и выполнить маневр, известный под название «убраться к чёрту отсюда». Причина использования реактивного топлива была вполне очевидна – лётчик уже имел его на борту, так что только лишь бак с окислителем должен был быть добавлен к самолёту.

Но была обнаружена сложность неожиданного рода. Предполагалось, что пероксид будет храниться на борту в алюминиевом баке. И затем оказалось, что следовые количества хлоридов в перекиси делают последнюю особенно коррозионной для алюминия. Как образом можно избежать попадания следовых количеств хлорида во *всё* что угодно, когда вы находитесь посреди океана солёной воды, было проблемой, чьё решение не было совершенно ясным.

И всегда стоял вопрос предотвращения серьёзного загрязнения. Скажем, кто-

то уронил (случайно или как-нибудь ещё) замасленный гаечный ключ в примерно 38.000 литров 90-процентной перекиси в хранилище на борту корабля. Что в этом случае произойдет – и выживет ли корабль? Этот вопрос настолько беспокоил народ, что один чиновник в ракетной подразделении (сидевший в безопасности в Вашингтоне) и начитавшийся книжек о капитане Горацио Хорнблоуэре², захотел, чтобы мы в NARTS сами построили бак ёмкостью около 38.000 литров, наполнили его 90-процентной перекисью и затем бросили туда – помоги мне, Господь – одну крысу (это человек не указал пол зверька). Только затратив значительные усилия, приложенные нашим шефом, удалось уменьшить масштаб приказа до одной тестовой пробирки и четверти дюйма крысиного хвоста.

Адмиралы авианосцев, по понятной причине, до смерти боялись огня. Это было одной из причин их отказа от кислоты и самовосламеняющегося горючего.

Аварийная ракета на палубе – или любого вида инцидент на корабле с участием горючего и топлива, неизбежно приводили к началу пожара. С другой стороны, разумно полагали, что реактивное горючее даже не смешается с пероксидом, просто плавая по его поверхности и не делая ничего особенного. И если, каким-либо образом, появится огонь, его можно будет потушить (возможно, при помощи пены) без особых затруднений.

Так что мы в NARTS решили провести испытание. Несколько ёмкостей с перекисью (примерно в 200 литров каждая) были вылиты в большой лоток, содержащий одной или двух ёмкостей с JP-4 плавало по поверхности, и вся система оставалась спокойной. Результат не производил впечатления, JP-4 горел спокойно со случайными вспышками и шипением огня. И начальник пожарной команды приступил к тушению пеной со своими людьми, и всё было погашено без какой-либо суеты. Конец тренировки.

В тот день Господь простёр свою длань над нашими головами – над пожарной командой, парой дюжин наблюдателей и над моей собственной персоной.

Но когда мы (и другие люди) попробовали провести испытание снова (к счастью, в меньшем масштабе), результаты были другими. Вначале реактивное горючее горело спокойно, затем со всё увеличивающейся частотой начали показываться вспышки языков пламени (это был момент времени, когда стоило начать убегать). Затем, слой JP стал тоньше, пероксид под ним нагрелся и начал кипеть и разлагаться, а вышележащее горючее стало пропитываться кислородом и парами перекиси. И затем всё это сдетонировало абсолютно ужасающим образом.

И когда военное начальство увидело одну или две демонстрации, реакцией стало «Не на *моём* авианосце», и с этим ничего нельзя было поделать.

Проект «Супер-П» был закрыт по многим причинам, но тесты сгорания в лотке оказали своё влияние на окончательное решение.

Удивительно, но следует заметить, что когда реальные тесты с пролитием были проведены с кислотой и НДМГ, результаты не были совсем уж ужасными. Формировалось сильное пламя, но обе компоненты столь активно реагировали, что большое количество жидкости некогда не смешивалось и не взрывалось, и компоненты скорее растекались. Так что горение вскоре прекращалось, и было

²Прим. перев. Горацио Хорнблоуэр (англ. Horatio Hornblower) — вымышленный персонаж, офицер Королевского Британского Флота в период наполеоновских войн, созданный писателем С. С. Форестером, впоследствии герой фильма и телесериала.

достаточно применить обыкновенную воду – и причём не в слишком большом количестве – для взятия ситуации под контроль. Так что ракеты, работавшие на паре кислота-НДМГ, в конце концов заняли свое место на авианосцах.

Чего не сделал пероксид. Его исследования продолжались несколько лет, и британцы разработали и построили самолёт с ракетным двигателем и одну или две ракеты на паре пероксид-JP, но на этом всё и закончилось, и затем около 10 лет перекись практически не рассматривалась в качестве окислителя (пероксид в качестве монотоплива представляет собой отдельную историю).

Более высокие концентрации (на данный момент вы можете купить перекись концентрацией 98 процентов) появились в последние пару лет, и они оказались гораздо стабильнее 90-процентного соединения, но все барабаны, в которые, ба-луясь, били производители, так и не привели подружку невесты на супружеское ложе. Перекись просто не годилась для этого.

Глава 6

Галогены, политика и дальний космос

В то время, как всё шло своим чередом, многие как не были уверены в том, что перекись, кислота или тетраоксид азота были последним словом в истории о долгохранимых окислителях, так и сомневались, что нельзя найти чего-то более мощного. Окислитель на основе кислорода очень хорош, но было вполне вероятно, что фторсодержащий эквивалент мог наголову его разбить. Так что все стали осматриваться вокруг в поисках легко разлагающегося соединения фтора, которое можно использовать в качестве долгохранимой топливной компоненты.

«Легко разлагающийся» является ключевой фразой. Многие соединения фтора вполне завершённые – причём настолько, что могут рассматриваться в качестве пепла сгоревшего во фторе элемента, бывшего весьма бесполезным в качестве топлива. Только в случае комбинирования фтора с азотом, кислородом или другим галогеном можно получить соединение, способное сжигать что-то ещё. И в 1945 году было известно не слишком много соединений фтора с такими элементами.

OF_2 был уже знаком, но сложен в синтезе, и его точка кипения являлась настолько низкой, что он должен был рассматриваться в качестве криогенной жидкости. Был отмечен O_2F_2 , но он оказался нестабильным при комнатной температуре. NF_3 был известен, но его точка кипения оказалась слишком малой для долгохранимости. Как ONF , так и O_2NF обладали низкой точкой кипения и не могли храниться в жидком состоянии при комнатной температуре для любого разумного значения давления (произвольным образом несколько лет спустя было указано, что долгохранимая топливная компонента при температуре 71°C (160°F) не должна иметь давление насыщенных паров выше, чем 500 psia, или 34 атмосферы). Фторнитрат и перхлорат фтора (FNO_3 и FCIO_4) являлись хорошо известными, но чувствительными и чрезвычайно взрывоопасными. Для последнего отмечалось, что он часто детонирует «при нагревании или охлаждении, замораживании или плавлении, испарении или конденсации, а иногда вообще без особой причины».

Оставались фториды галогенов. Как IF_5 , так и IF_7 плавилась при температуре около 0°C , и мысль иметь при себе данный тяжёлый атом йода не была привлекательной. BrF был нестабилен, BrF_3 и BrF_5 были уже известны, и если что-то из них предполагалось бы к использованию, то пентафторид очевидно являлся более

предпочтительным по той причине, что он содержал больше фтора. ClF был низкокипящим и не имел достаточно фтора в своём составе. Так что оставался ClF_3 и, возможно, при крайней необходимости или в случае важности плотности, BrF_5 (этот фторид имеет плотность 2,466 при 25°C).

И это было всё, хотя ЛРД в 1947 году предавалась таким смутным фантазиям, как F_2O_7 , и Harshaw Chemical Co. потратила приличное количество времени и денег в 1949 и 1950 годах, пытаясь синтезировать вещи вроде HClF_6 и AgF_4 ¹, и, естественно (как мы сейчас можем сказать с абсолютной точностью), полностью провалились. Нужно сказать, что попутно они *выучили* много нового о синтезе и свойствах OF_2 .

Так что нужно было использовать ClF_3 . Отто Рафф обнаружил его в 1930 году (наряду с открытиями большинства соединений, перечисленных выше), немцы проделали небольшую работу в течение Второй Мировой войны, так что довольно многое было уже известно. Расцвет химии фтора, вызванный Манхэттенским Проектом, привел к исследованиям в Соединённых Штатах, и люди из Оак Ридж наряду с другими специалистами исчерпывающе разобрались в данной теме в конце 1940-ых и начале 1950-ых. Так что эта область не была совершенно неизученной в тот момент, когда ракетчики приступили к работе.

Трифторид хлора ClF_3 , или STF, как инженеры настоятельно его называют, является бесцветным газом, зеленоватой жидкостью или белым веществом в твёрдом состоянии. Он кипит при 12° (так что разумное давление будет сохранять его в жидком состоянии при комнатной температуре) и замерзает при удобных -76°. Также он имеет приличную плотность около 1,83 при комнатной температуре.

Также весьма вероятно, что большинство существующих наиболее активных фторсодержащих агентов действуют гораздо более активно, чем сам фтор. Газообразный фтор, конечно же, менее плотен, чем жидкий ClF_3 , и жидкий фтор настолько охлаждён, что его способность к реакции существенно снижена.

Всё это звучит довольно академично и безобидно, но при переносе тяжести вопроса на проблему обращения с вышеуказанным соединением результаты становятся ужасающими. Трифторид хлора, конечно же, чрезвычайно токсичен, но это только часть беды. Он самовосламеняется со всеми известными горючими, причем настолько быстро, что так и не удалось замерить задержку зажигания. Он также самовосламеняется с такими вещами, как одежда, шерсть и инженеры тестирования, не говоря об асбесте, песке и воде – с которыми идет взрывная реакция. Трифторид хлора может храниться в некоторых металлах с обычной структурой – стали, меди, алюминии и т.д. – по причине формирования тонкой пленки нерастворимого фторида металла, защищающего основную часть материала точно таким же образом, как невидимый слой оксида алюминия предотвращает его сгорание в атмосфере. Однако если этот слой расплавлен или поцарапан и не имеет шанса к восстановлению, испытатель сталкивается с разрешением проблемы метал-фторового огня. Для того, чтобы иметь дело с подобного рода ситуацией, я всегда рекомендовал хорошую пару беговой обуви. И если даже у вас не произошло возгорание при утечке трифторида хлора, результаты могут быть достаточно разрушительными, как это выяснила компания General Chemical Co., пролив это

¹ Недавно было показано, что фторид аргона, возможно ArF_2 , в самом деле существует, но является нестабильным во всех случаях, кроме криогенных температур.

соединение. Их менеджеры по продажам были ужасно скрытными при обсуждении данной темы, и так продолжалось до тех пор, пока я не пригрозил, что закуплю КДАК у Дюпон, после чего один из них поделился деталями.

Всё произошло на установке в Shreveport, Луизиана, когда они в первый раз готовили к отправке однотонный стальной цилиндр с СТФ. Этот цилиндр был охлажден сухим льдом для облегчения заправки материала, и холод в конце концов привел к охрупчиванию стали. В тот момент, когда цилиндр перемещали на платформу, он раскололся, и одна тонна трифторида хлора пролилась на пол. Этот окислитель прогрыз себе дорогу в трёхстах миллиметрах бетона и вырыл метровую яму в нижележащем гравии, заполнил все помещение парами, вызвавшими коррозию всего, что было в поле зрения и, если говорить в целом, привёл к чёртовой куче разрушений. Прибывшая на место служба гражданской обороны начала эвакуацию окрестностей, и, мягко говоря, имел место сильный скандал до того, как это происшествие утихло. Чудесным образом никто не погиб, но имел место один несчастный случай с человеком, устанавливавшим цилиндр в момент пролива. Он был найден почти в двухстах метрах от места аварии, откуда примчался, развив скорость в два Маха, и всё ещё продолжал ускоряться, когда был остановлен сердечным приступом.

Этот случай всё ещё был в будущем, когда ракетчики начали работать с СТФ, но, тем не менее, они знали достаточно для того, чтобы быть смертельно напуганными и действовать со такой же степенью осторожностью, как и при протезировании зубов королевской кобры. И они не имели ни малейшего повода сожалеть о такой предусмотрительности, данное соединение постоянно подтверждало свою репутацию.

Берт Абрамсон из Bell Aircraft прожиг его весной 1948 года, используя гидразин в качестве горючего, NACA и North American продолжили процесс на следующий год, и в 1951 году NARTS провела испытания с аммиаком и гидразином.

Результаты были превосходными, но сложности доводили до белого каления. Зажигание оказалось замечательным и настолько гладким, что выглядело оно подобно включению подачи воды из шланга. Эффективность была высокой — очень близкой к теоретической — и реакция проходила настолько быстро, что вы могли сжигать это соединение в удивительно маленькой камере. Но... Если ваше оборудование было грязным, и имелись пятна масла или смазки где-нибудь внутри топливной магистрали, указанная магистраль воспламенялась и полностью сгорала, оставляя только пепел. Прокладки и О-кольца в основном должны были быть из металла; не допускалось контакта с органическими материалами в ходе зажигания. Тефлон мог продержаться при статических условиях, но если СТФ с любой скоростью протекал через него, то тефлон растворялся подобно сахару в горячей воде даже если и не происходило воспламенения. Так что соединительные элементы должны были быть приварены во всех возможных случаях, и сварка должна была быть качественной. Попадание окалина в сварной шов могло вызвать реакцию и далее передать эстафету даже без предварительных попыток. Так что швы должны были быть сварены, проверены, гладко отполированы и перепроверены, и затем все магистрали очищены и пассивированы перед тем, как вам хватило смелости залить СТФ в систему. Вначале проводилась промывка водой и линии осушались азотом. Затем наступал черёд трихлорида этилена для удаления

всех следов масла или смазки, после чего следовала еще одна продувка азотом. Потом газообразный СТФ добавлялся в систему и оставлялся там на несколько часов для захвата всего, что могло быть не удалено промывкой, и только *затем* жидкий трифторид хлора мог попасть в топливные магистрали.

При поступлении этого окислителя в двигатель начинались настоящие проблемы, для трифторида хлора рабочие температуры близки к 4000 К, при которых форсунки и критические сечения сопла имеют печальную тенденцию к разрушению, и если только материалы для изготовления не были выбраны со значительной ловкостью, а устройство двигателя *очень* удачно, то он не прослужит на самом деле долго. Человеку, занимающемуся вопросами топлива, СТФ нравится по причине его эффективности, и инженер ненавидит эту зверюгу ввиду агрессивности к двигателю и сложностям в обращении. Хотя он и должен был научиться жить с ним, процесс обучения максимально им откладывался. Только с недавнего времени по мере того, как потребители стали запрашивать эффективность выше той, что может быть выжата из ИКДАК-НДМГ, СТФ стал предметом гораздо более интенсивного и масштабного тестирования.

Пентафторид брома BrF_5 очень похож на ClF_3 в смысле эксплуатационных качеств за исключением температуры кипения ($40,5^\circ$), которая слегка выше. Весьма странно, что этот окислитель так и не показал эффективность, какую должен был, и для него гораздо тяжелее получить подходящую долю от теоретической производительности во время стендовых испытаний, чем для СТФ. И никто не знает причину.

На очень раннем этапе исследований для некоторых из нас в области топливной химии стало ясно, что не всякое доступное горючее было подходящим для ClF_3 . Производительность аммиака была слишком низкой, и гидразин при отличной энергетике и плотности замерзал при слишком высокой температуре. И все остальные имели углерод в составе, что было плохо для окислителя на основе фтора (смотри главу, посвященную эффективности). В этом случае значение этого показателя падает, и выбрасывается бросающаяся в глаза дымная реактивная струя. Так что во второй половине 1958 года Том Райнхард из Bell, Стэн Танненбаум из RMI и я в NARTS независимо друг от друга попытались что-то с этим поделать. И поскольку химики в ответ на похожие вопросы как правило выдают похожие ответы, мы двигались в очень близких направлениях. Стэн и Том решили, что самое лучшее, с чего начать, было взять ММГ, CH_6N_2 , который был настолько близок к гидразину, насколько это возможно, и затем добавить кислород к системе для дожигания углерода до CO . И они добились этого, смешав один моль воды с одним молем ММГ для получения смеси, эквивалентной COH_8N_2 . Затем эта смесь была прожжена с СТФ, углерод и кислород образовали CO и водород сгорал до HCl и HF . Эффективность была слегка ниже, чем у гидразина, так как значительное количество энергии тратилось на разложение воды, но все ещё лучше, чем у аммиака. И учёные обнаружили, что можно добавить значительное количество гидразина (от 0,85 до одного моля ММГ) к смеси без увеличения температуры замерзания выше -54° . В настоящее время Bell Aerosystems называет эту смесь BAF-1185.

Я тоже начал с ММГ, но при этом держал в голове всю работу, проведенную нами с нитратом гидразина $\text{N}_2\text{H}_5\text{NO}_3$, и использовал его в качестве носителя кис-

лорода, смешав один моль с тремя молями ММГ. И обнаружил, что мог добавить моль или два чистого гидразина к смеси без разрушения точки замерзания. Мне хотелось провести вычисления значения эффективности для сравнения её с гидразином, и я позвонил Джеку Гордону из RMI для получения величины теплоты формирования ММГ и нитрата гидразина. Он был (и остается) ходячей энциклопедией данных термодинамики, так что я не был слишком удивлен тому, что у него уже были значения, готовые сорваться с кончика языка. Но этот факт отложился в моем подсознании для будущего использования.

Так или иначе, я произвёл нужные вычисления и полученные результаты выглядели хорошо – около 95 процентов от значения эффективности чистого гидразина и отсутствие проблем с точкой замерзания. Так что мы изготовили большое количества соединения и пропустили его через пресс, выясняя, насколько это было возможно, его характеристики, в итоге оказавшиеся весьма неплохими. Мы провели тест с карточной прослойкой² и обнаружили, что образец довольно малочувствителен к удару несмотря на всё, что окисляло соль в его составе. Так что казалось, что было получено достаточно разумное решение проблемы, поэтому мы закодировали соединение под названием «Hydrazoid N» и поставили его на полку до того момента, как он понадобится инженерам.

После этого однажды мне позвонил по телефону Стэн Танненбаум и спросил – «Джон, не сделаешь для меня тест с карточной прослойкой?» (RMI не обладал необходимым для этого оборудованием, при этом RMI и моя группа всегда имели комфортный, без излишней подготовки и документооборота по принципу «что начальству неизвестно, то его не беспокоит» уровень взаимоотношений, так что я не был удивлен запросом).

«Конечно, Стэн, нет проблем. Что за штуку ты хочешь испытать со мной?»

Он помедлил какое-то время и затем ответил – «Это закрытая информация и, боюсь, я не могу тебе её сообщить...»

«(Бип) мать, Стэн,» – дружелюбно прервал его я – «если ты думаешь, что я собираюсь попросить своих людей испытать неизвестное что-то, то тебе точно прилетело по голове.»

Наступила длинная пауза, и я подозреваю, что моя реакция не была неожиданной. Затем последовало – «Ну, это замещенный гидразин с некой окисляющей добавкой...»

«Не говори мне, Стэн» – прервал я его, и моё подсознание сложило все кусочки головоломки вместе. «Давай я отвечу тебе. Вы взяли три моля ММГ и один

²Тест с карточной прослойкой используется для определения чувствительности к удару потенциально взрывоопасной жидкости. 50-граммовый блок тетрила (сильно взрывчатого) детонирует под 40мл образца исследуемой жидкости, содержащейся в железной трубке длиной 3 дюйма (76,2 мм) и толщиной в дюйм (25,4 мм), запечатанной снизу тонкой полоской тефлона. Если жидкость детонирует, то пробивается дыра в целевой пластинке, изготовленной из котельного железа толщиной в $\frac{3}{8}$ дюйма (около 10 мм) и расположенной сверху от трубки. Чувствительность жидкости измеряется в количестве «карт», представляющих собой тонкие диски толщиной 0,01 дюйма (0,254 мм) из ацетата целлюлозы, что должны быть закреплены между тетрилом и образцом, предохраняя последний от взрыва. Ноль карт означает относительную нечувствительность, сто карт сигнализируют о том, что тут лучше держаться в стороне. Как можно себе представить, тест довольно шумен, и лучше всего его проводить на некотором расстоянии от мест проживания людей или, по крайней мере, вдалеке от тех, кто может приставать со своими возражениями.

нитрата гидразина и...»

«Кто тебе это сообщил?» – недоверчиво спросил Стэн.

Прости меня, Господь, но я не мог устоять. «О, мои люди повсюду», ответил я беззаботно, «и эта смесь не взрывается даже при нулевой карточной прослойке». И повесил трубку.

Но пару минут спустя я опять был на телефонной линии, разговаривая с людьми из ракетного подразделения в Вашингтоне и давая им знать, что MNF-1 от RMI и Hydrazoid от NARTS были одинаковыми соединениями, что я и Стэн Танненбаум одновременно и независимо получили одинаковый ответ, и что никто ничего у друг друга не крал. Это было подходящий момент для подавления слухов в самом зародыше!

Через несколько лет (в 1961 году), размышляя на тему, что если нитрат гидразина был хорош, то перхлорат гидразина должен быть ещё лучше, я изготовил Hydrazoid P, состоявший из одного моля перхлората, $N_2H_5ClO_4$, четырех молей ММГ и чистого гидразина соответственно. Эта смесь определённо превосходила Hydrazoid N со значением эффективности в 98 процентов от чистого гидразина и слегка более высокой плотностью. Смешивая их вместе, однако, я помнил о предшествующем опыте с перхлоратом гидразина и нашел способ его использования без какого-либо изолирования сухой соли, процедуры, которую, как вы должны помнить, следует избегать. Вместо этого я добавил нужное количество перхлората аммония (что удобно, безопасно и легко в обращении) к гидразину и удалил замещенный аммиак потоком азота, после чего добавил уже ММГ, и цель была достигнута. Смесь оказалась несколько коррозионной для нержавеющей стали при 71° (перхлорат гидразина в *гидразине* является сильной кислотой), но когда я её пролил, поведение смеси испугало инженеров. Если она загоралась, растекаясь по поверхности, то некоторое время пламя оставалось спокойным, а затем, по мере роста концентрации перхлората гидразина, наступал момент детонации – при этом сильной (Hydrazoid N, или любая подобного рода смесь, производила бы такой же эффект).

Казалось вероятным, что если скорость горения смеси может быть увеличена настолько, что реакция будет происходить в жидкой фазе, избегая газообразную, то перхлорат не сконцентрируется, и от проблемы можно будет улизнуть. Конечно же, мне было известно, что некоторые оксиды и ионы металлов катализируют разложение гидразина, но не хотелось иметь с этим дело кроме как при условиях сгорания. Ответ состоял в обертывании иона особого рода защитной структурой, которая исчезала бы при температурах горения. Так что я велел одному из членов нашей банды приготовить ацетилацетонат каждого металла, что он мог найти на складе.

Он вернулся с примерно дюжиной соединений, и мы их опробовали. Некоторые не оказывали никакого эффекта, другие начинали разлагать Hydrazoid P сразу же, как были добавлены в раствор. Но ацетилацетонат никеля работал великолепно, не оказывая никакого воздействия при комнатной температуре или при хранении. Но полпроцента его или что-то около того на порядок ускоряло сгорание Hydrazoid P как на воздухе, так и когда мы сжигали это соединение под давлением как монотопливо. Но когда мы провели огневые испытания на открытом пространстве, результаты не были столь хороши. Фактор неизвестности добавил-

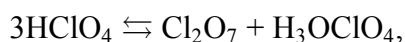
ся к горению Hydrazoid, и вместо детонации при каждом испытании, она стала происходить в одном случае из трех. Так что инженеры всё ещё боялись данное соединение.

И ещё одна жалость – в случае никелевого катализатора горючее выдавало особенно красивое пурпурное пламя, и по какой-то причине мне всегда хотелось иметь дело с топливом такого цвета!

Для ClF_3 были разработаны и другие горючие, но в целом они были довольно близки к тем, что я описал, включавшим в свой состав углерод, сбалансированный до СО путем различного рода добавления кислорода к смеси. В целом, проблема могла быть рассмотрена в качестве вполне поставленной под контроль. Опасность детонации после пролива важна на проверочной площадке, не *не* в случае заправленной ракеты.

В то время, как продолжались работы с STF , и люди пытались получить хорошее горючее для него, они также очень внимательно присматривались к оксидам хлора и его производным. Cl_2O_7 с эндотермической температурой образования $+63,4$ ккал/моль, был самым мощным жидким окислителем в начале 50-ых, и предварительные вычисления показывали что он должен был дать замечательно высокую эффективность с любым видом топлива. Однако, имелся один небольшой недостаток – этот окислитель взрывался с большой мощностью по малейшей причине или даже вообще без оной. От начала и до конца, по крайней мере пять лабораторий попытались укротить его без всякого успеха. Подход состоял с нахождением добавок, снижавших чувствительность или стабилизирующих окислитель – Олин Метьюсон в одиночку опробовал около семидесяти вариантов – но всё завершилось полнейшим провалом.

Близкородственная хлорная кислота первоначально показалась более многообещающим кандидатом. Во всяком случае, её выделение теплоты при образовании было экзотермическим, так что эта кислота по крайней мере должна была показать малую склонность к разложению на исходные элементы. Однако, 100-процентная хлорная кислота подобно азотной не в полной мере является тем, чем кажется. Для концентрированной кислоты устанавливается равновесное состояние:



так что всегда в наличии имеется очень чувствительный оксид, готовый к созданию неприятностей. И когда он начинает реагировать с хлорной кислотой, последняя разлагается не на исходные элементы, а на хлор, кислород и H_2O с выделением достаточного количества энергии для того, чтобы напугать всех до смерти.

Я размышлял над этим фактом и пришел к следующей идее. Структура хлор-

ной кислоты может быть записана как $\text{H}-\text{O}-\text{Cl}=\text{O}$. Далее, если группа HO

замещена F и получено $\text{F}-\text{Cl}=\text{O}$, то каким образом эта штука может разла-

гаться? Определённо, не должно быть очевидных продуктов, чьё формирование освобождает много энергии, и соединение могло бы оказаться достаточно стабильным. И оно должно являться на самом деле хорошим окислителем.

Так что в один из дней весны 1954 года Том Райнхард, бывший тогда главным инженером в NARTS, доктор Джон Гэлл, работавший директором по исследованиям в Pennsalt Chemicals и я собственной персоной сидели за столом в моей лаборатории, трепались попусту и обсуждали топлива в целом. Джон пытался продавить нас в направлении NF_3 , но нам не было интересно ничего с температурой кипения -129° . Затем я поднял тему данной гипотетической производной хлорной кислоты, добавив свое предположение, что она могла бы быть низкикипящей, но не настолько, что её нельзя было хранить в жидком виде под давлением при комнатной температуре. Далее я предположил, что она должна была быть довольно химически инертной «по причине жесткой электронной оболочки». И затем я спросил – «Джон, ты можешь её для меня изготовить?».

Его ответ, выданный со значительным чувством удовлетворения самим собой, был достаточен для прекращения любой встречи – и начала новой. «Она *уже* изготовлена, её свойства именно те, что ты предсказал, и, по чистому совпадению, мы только что наняли человека, который это обнаружил.»

Мой радостный вопль разбудил собаку при пожарной части на удалении в 600 метров – и это стало началом программы по изучению фторида хлорноватой кислоты. Кажется, в 1951 году некие работники в Германии обработали хлорат натрия NaClO_3 газообразным фтором и получили фторид натрия и различные неидентифицированные газообразные продукты, которые они так и не распознали – но один из них, рассматривая ситуацию задним числом, должен был быть фторидом хлорноватой кислоты. Затем, в 1952 году Энгельбрехт и Атцвангер в Австрии растворили перхлорат натрия в безводной плавиковой кислоте HF и применили электролиз к этой жидкости с основной целью, как я полагаю, просто посмотреть на получившийся результат. Они собрали выделившиеся газы, отделили их друг от друга и изолировали фторид хлорноватой кислоты. В силу того, что водород, фтор и некоторые другие элементы были смешаны все вместе, исследователей преследовали взрывы, при этом они каким-то образом сумели выжить (Энгельбрехт был в какой-то мере по настоящему храбр до безумия. Ещё одним из его деяний была разработка ужасающего газового резака, работавшего за счет сжигания измельченного алюминия в газообразном фторе. Он был способен прорезать бетонный блок под аккомпанемент жуткого зрелища, состоявшего из искр, пламени и паров, что предполагало наличие неадекватно контролируемой катастрофы). Я пропустил отчет об открытии (напечатанный в Австралийском журнале, который обычно не читал), но в Pennsalt скорее всего отчет видели и решили, что Энгельбрехт был как раз тем типом человека, который был им нужен.

В июне Бюро Аэронавтики одобрило для NARTS программу исследование фторида хлорноватой кислоты, и Pennsalt прислал нам тридцать три грамма этой кислоты в октябре – с трудом произведенной по методу Энгельбрехта. И затем, пока мы пытались определить параметры материала, они начали поиск более простого пути его изготовления. Доктор Берт-Вейрналп в их лаборатории пришел (и запатентовал) к синтезу, который позволял приготовить эту кислоты довольно просто и дешево. Это происходило путем реакции $\text{KClO}_4 + (\text{избыток}) \text{HSO}_3\text{F} \rightarrow$

$\text{KHSO}_4 + \text{FCIO}_3$, что выглядит проще, чем оно есть на самом деле. При этом в реальности никто не понимал механизм реакции.

В то время, пока мы описывали свойства кислоты, Pennsalt занимался тем же самым и пересылал свои результаты нам, и в течение нескольких месяцев нам было известно практически всё, что мы только и хотели знать о данной кислоте. И было большим удовольствием работать с такой группой, я мог позвонить в один из дней, спрашивая, скажем, о вязкости как функции от температуры, и в течение недели они проводили измерения (а измерения вязкости жидкости под давлением её собственных паров не слишком простой процесс) и высылали мне результаты.

В 1955-ом году мы были готовы к работе с двигателем. Pennsalt переслал нам – или даже скорее перенес – четыре с половиной килограмма фторида хлорноватой кислоты (она была приготовлена при помощи старого процесса, так как новый ещё не был полностью готов, и стоила нам около 1200 долларов за килограмм. И мы не переживали, так как ожидали, что эта кислота обойдется нам в больше чем 2200 долларов за кило).

При наличии четырех с половиной килограмм соединения мы смогли провести небольшие двигательные тесты (горючим был ММГ) и обнаружили, что в наших руках имелся очень хороший окислитель. Его эффективность была очень близка к таковой ClF_3 с гидразином, и не было никакого повода беспокоиться о температуре замерзания. Имела место самовосламеняемость с ММГ, но зажигание проходило очень жёстко³, так что мы использовали инициирующий запал с КДАК. Позднее, Берт-Вейрналп попробовал смешать небольшое количество фторида хлорила ClO_2F с кислотой и таким способом получил самовосламенение⁴. Но что радовало ракетных механиков, так это тот факт, что в отличие от всех остальных окислителей вы практически не могли нанести себе вреда до тех пор, пока, как сказал Энгельбрехт, «не уроните цилиндр с этим окислителем себе на ногу». Токсичность была на удивление низкой, и данная кислота не атаковала ни воспламеняющиеся вещества, ни человеческую кожу, она не поджигала вас – в действительности, было одним удовольствием иметь с ней дело.

Что же в конце концов не срослось, так это довольно низкая плотность при комнатной температуре – 1,411 по сравнению с 1,809 у STF, и, в силу того, что критическая температура составляла всего 95°, соединение имело очень высокий коэффициент расширения. Его объем увеличивался бы на 20 процентов при росте температуры от 25° до 71°, так что ваши баки всегда должны были быть переразмеренны. Эта кислота, однако, полностью смешивалась со всеми галогеновыми окислителями, подобным STF, и могла быть добавлена к последнему для того, чтобы помочь ему при сгорании с углеродосодержащими горючими, которым требовался кислород. Это свойство будет, видимо, использоваться в будущем.

В то время как PF (названный так в целях секретности и из уважения к инже-

³Кажется, что жидкий фторид хлорноватой кислоты реагирует с жидкими аминами, гидразинами или аммиаком как $\text{FCIO}_3 + \text{H}_2\text{N}-\text{R} \rightarrow \text{HF} + \text{O}_3\text{Cl}-\text{NH}-\text{R}$, и соединения по типу перхлорамида в высшей степени и чрезвычайно взрывоопасны. Отсюда и жесткий запуск.

⁴Фторид хлорила ClO_2F впервые был описан Шмитцем и Шумахером в 1942 году. Он был до неприличия активен при реакции и наиболее сложен в хранении из всех представителей семейства Cl-O-F по причине возможного растворения защитной пленки фторида металла, что, со своей стороны, делало обращение с ClF_3 сравнительно простым.

нерам, которые, судя по всему, не вполне могли произнести слово «хлорноватая») исследовался, следующий кандидат готовился к выходу на публику. В этот период несколько лабораторий пытались получить долгохранимые окислители с эффективностью, лучшей чем у ClF_3 , и в 1957 году Колбурн и Кеннеди из Rohm and Haas провели реакцию трифторида азота⁵ с медной стружкой при 450° , производя N_2F_4 путем реакции $2\text{NF}_3 + \text{Cu} \rightarrow \text{CuF}_2 + \text{N}_2\text{F}_4$.

На этом пути было нечто интересное, и топливное сообщество выпрыгнуло, оттолкнувшись двумя ногами, на сцену с радостными криками. Исследование пошло в двух направлениях – улучшении метода синтеза тетрафторида гидразина (как оно было названо⁶) для первого и определении физических свойств и химии для второго.

Rohm and Haas придумали отчасти эзотерический, если не сказать даже эксцентричный, метод синтеза, когда они провели реакцию NF_3 с горячим мышьяком (как говорится – ничего себе). Stauffer Chemical же провели реакцию NF_3 с горячим углеродом в кипящем слое, легко контролировавшуюся, но выдававшую продукт, сильно загрязненный большим количеством C_2F_6 , который было практически невозможно удалить. Дюпон разработал совершенно другую схему синтеза, при которой NF_3 и NO реагировали при 600° в никелевой проточной трубе с формированием N_2F_4 и NOF . Другие схемы проходили через дифторамина, HNF_2 , готовившийся путем реакции мочевины в водном растворе с газообразным фтором с формированием F_2NCONH_2 и последующим гидролизом горячей серной кислотой с высвобождением HNF_2 . Последним шагом было окисление дифторамина до N_2F_4 . Callery Chemical Co. получила этот продукт из гипохлорида натрия в сильнощелочном растворе; Аэроджет наряду с Rohm and Haas достигли того же результата с ионами железа в кислом растворе. Процесс Дюпон и синтез через HNF_2 являются теми методами, что используются в настоящее время. (Имело место некоторое желание использовать HNF_2 сам по себе в качестве окислителя – его точка кипения в $-23,6^\circ$ и плотность выше 1,4 – но он настолько взрывоопасен, что идея не зашла далеко. При применении же в качестве промежуточного продукта его нужно производить в виде газа и тут же использовать в ходе реакции.)

Тетрафторид диазота определённо был высокоэнергетическим окислителем с высокой теоретической эффективностью с такими горючими, как гидразин (Мантц и его группа в NBS быстро определила его теплоту образования, так что могли быть выполнены точные вычисления), и когда Аэроджет в 1962 испытал его с гидразином и пентабораном, они получили от 95 до 98 процентов от значения теоретической производительности. И данный окислитель имел довольно

⁵Изготовление NF_3 достаточно хитроумно. Это может быть сделано путем электролиза расплавленного бифторида аммиака при помощи графитных электродов. Они должны быть графитными – если вы используете никель, вы не получите NF_3 – и выход продукта зависит от того, кто произвел этот графит. И не спрашивайте меня, почему.

⁶ N_2F_4 является неорганическим соединением, и должно именоваться в соответствии с правилами номенклатуры неорганической химии как «тетрафторид диазота» по полной аналогии с «тетраоксидом диазота» для N_2O_4 . Вместо этого оно было названо по правилам номенклатуры органической химии как производное гидразина. Такого рода вещи постоянно происходили когда органический химик пробовал дать имя неорганическому соединению, и неорганический химик создавал путаницу с названиями органики.

высокую плотность 1,397 при температуре кипения, но она составляла $-73^{\circ 7}$, что выводило соединение из класса долгохранимых компонент.

И данное обстоятельство привело к концепции «компонент, долгохранимых в космосе». Как вы помните, 1957 был годом Первого Спутника, когда общественность неожиданно осознала, что вся эта научно-фантастическая чепуха о космических путешествиях может по настоящему к чему-то привести. Всё даже отдаленно относящееся в космосу неожиданно стало высокооплачиваемым, и если эксплуатирующие организации не были в состоянии использовать N_2F_4 в ракетах, возможно, что космические агентства (НАСА и позднее NASA) могли бы найти применение ему в космосе. В конце концов, глубокий вакуум вне атмосферы является весьма хорошим изолятором, и когда у вас есть, что замечательно, сосуд Дьюара размером со вселенную, можно хранить низкокипящее горючее в течение долгого времени. Произвольная верхняя граница (-150°) была установлена для точки кипения компонент, долгохранимых в космосе, но обычным делом было растянуть этот показатель для того, чтобы включить нужное вам топливо. OF_2 с температурой кипения в $-144,8^{\circ}$ был рассмотрен как хранимый в космосе, но если хотелось так же назвать его идеального партнера метан CH_4 , кипящего при $-161,5^{\circ}$, никто не стал бы слишком громко возмущаться.

NF_3 довольно инертен, и его химия не слишком сложна, но N_2F_4 оказался другого поля ягодой с чрезвычайно разнообразным и интересным химическим поведением. Люди, занимавшиеся топливами, не были особенно счастливы иметь дело с этой разработкой, так как они предпочитали неактивное горючее, которое просто находится в баке и ничего не делает до тех пор, пока не приступят к его сжиганию.

N_2F_4 реагирует с водой с образованием HF и разного рода окислов азота, с окисью азота, формируя нестабильную и ярко окрашенную (фиолетовым цветом) F_2NNO , а также с потрясающе большим количеством кислород-содержавших соединений с формированием NF_3 , NOF , N_2 . И, кроме того, со смешанными окислами азота путём реакции, которая обычно сильно зависит от начальных условий и часто находится под влиянием следовых количеств воды или окислов азота, материала реактора и всего остального, о чем только экспериментатор может (или не может) подумать. Многие из результатов реакций тетрафторида диазота проистекали из того факта, что он всегда частично разлагается до $2 NF_2$ точно также как и N_2O_4 всегда частично распадается до $2 NO_2$, и степень разложения увеличивается с ростом температуры. Это то, как галоген вроде Cl_2 ведёт себя, и N_2F_4 может быть рассмотрен в качестве его псевдо-аналога. Нидерхаузер из Rohm and Haas подумал, что если это так, то может быть добавлена поперечная двойная связь, а затем провел реакцию в газовой фазе с этиленом – и получил $F_2NCH_2CH_2NF_2$. Эта реакция оказалась общего рода и привела ко многим вещам, некоторые из которых будут описаны в главе, посвященной моногорючим.

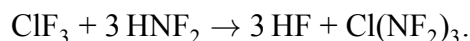
Обращение с N_2F_4 и его характеристики довольно хорошо поняты в насто-

⁷Данная точка кипения стала сюрпризом для многих, кто ожидал, что она будет чем-то близким к таковой у гидразина или около 100° . Но некоторые из нас уже заметили, что точка кипения NF_3 была очень близка к точке кипения CF_4 , и по этой причине ожидали, что N_2F_4 не будет слишком отличаться от C_2F_6 с -79° . Так что некоторые из нас по крайней мере не были разочарованы в силу отсутствия больших ожиданий в самом начале.

ящее время, и это, несомненно, окислитель с высокой эффективностью, но его будущую роль в качестве топлива оценить тяжело. Никто не собирается использовать его для военных целей, и жидкий кислород лучше и дешевле для больших ускорителей. Он может найти, в конце концов, некоторое применение для миссий в дальнем космосе. Космический корабль, запущенный Сатурном, может лететь годами перед запуском двигателя для перевода на целевую орбиту, и даже с термоизоляцией, предоставленной вакуумом, может оказаться сложно хранить жидкий кислород в течение этого долгого времени. А N_2F_4 , возможно, будет заморожен до твердого состояния.

Когда Кеннеди и Колбурн обнаружили тетрафторид диазота, они знали, за чем охотились. Но следующий окислитель был открыт людьми, искавшими нечто совершенно другое.

Видимо, в начале 1960 доктор Эмиль Лаутон из Rocketdyne, снабженный контрактом ВВС, придумал идею, казавшуюся блестящей на тот момент. Можно было провести реакцию между трифторидом хлора и дифтороамином, получив, таким образом,



Также он привлек к работе доктора Дональда Филиповича, имевшего прозвище «Флип», тот создал металлическую вакуумированную линию и принялся за дело. Но ему не удалось получить желаемое, и, в основном, синтезировался $ClNF_2$ плюс небольшое количество «Соединения X». Это соединение показывало ярко выраженный пик NF_2O^+ на масс-спектрометре, и вопросом было происхождение кислорода. Учёный провёл исследование и обнаружил, что использованный им трифторид хлора был сильно загрязнён $FClO_2$ и ClO_2 .

Одновременно доктор Уолтер Майя из той же группы изготавливал O_2F_2 путём электрического разряда в смеси фтора и кислорода и случайно допустил наличие воздуха в смеси, что также привело к появлению Соединения X.

В это время Флип был занят другой работой, так что Майя занялся проблемой данного соединения. Он обнаружил, что электрический разряд в смеси воздуха и фтора давал X, но разряд в смеси кислорода и NF_3 делал это даже лучше. Доктор Бартоломео Таффи из их аналитической группы изобрел хроматографическую колонну с сгустившимся фторуглеродным газом для отделения X от NF_3 , и его масс-спектрометрия и молекулярный вес однозначно идентифицировали соединение как ONF_3 или давно ожидаемый F_2NOF .

В то же самое время группа из Allied Chemical, состоявшая из докторов У.Б. Фокса, Дж.С. Маккензи и Н. Вандеркука, изучали реакцию электрического разряда для OF_2 и NF_3 , и примерно в середине 1959 года получили инфракрасный спектр загрязнённой смеси, но не идентифицировали свой продукт. Эти две группы сравнили свои результаты и спектры в январе 1961 года и обнаружили, что они получили одинаковое соединение. Спектроскопия ядерного магнитного резонанса (ЯМР) показала, что это был ONF_3 , а не F_2NOF .

Моралью данной истории было то, что к вашей смеси всегда стоило попробовать применить электрический разряд, если вы охотитесь за новыми соединениями. Вы *не* знаете, что произойдет, случиться же может почти что угодно.

Группа Билла Фокса быстро обнаружила, что ONF_3 может быть синтезирован путем фотохимического фторирования ONF или при сжигании в пламени фтора NO с быстрым охлаждением. Последний вид синтеза лучше подходит для сравнительно масштабного производства.

Чуть позже мне довелось возглавить секцию по синтезу топлива на одной из больших конференций, и я обнаружил в программе, что как Rocketdyne, так и Allied делали доклад по поводу ONF_3 . Мне было известно, что они сильно расходились в своей интерпретации химической связи в этом соединении, так что я перестроил программу докладов, поместив оба отчета друг за другом в надежде, что начнется бой. Правда, неудачно – обе команды были слишком вежливы, что в данном случае было плохо.

Ещё одна встреча несколько лет спустя привела к более интересным результатам. В июне 1966 года в Ann Arbor проходил симпозиум по химии фтора, и один из докладов, сделанный профессором Университета Британской Колумбии Нилом Барлеттом, был посвящен открытию и свойствам ONF_3 . Барлетт, будучи виртуозом химии фтора, открывателем OIF_5 и фторидов ксенона, разумеется, не слышал о «закрытом» исследовании Rocketdyne и Allied. Но Билл Фокс, увидев расширенную программу, в ускоренной темпе снял гриф секретности со своего отчета по данному соединению и представил его сразу вслед за Барлеттом, описывая как несколько методов синтеза, так и практически все интересные свойства этого соединения. Билл, насколько только это было возможно, старался не выставить Барлетта в глупом свете, и Барлетт усмехнулся и не обратил на это внимание – «ну, давайте вернемся к вопросу о вакуумных сетках» – но данный инцидент является неким примером для типов, сидящих в башне из слоновой кости и убежденных в интеллектуальном (и моральном) превосходстве «чистого» самостоятельного исследования по сравнению с прикладным и направляемым.

Вышеуказанное соединение было названо оксидотрифторидом азота, а также трифторидом нитрозила и оксидом трифтороамиона. Первый вариант, возможно, является наиболее подходящим. Соединение кипит при $-87,5^\circ$, и его плотность при данной температуре составляет 1,547. Оно гораздо менее активно химически, чем тетрафторид диазота и поэтому проще в обращении, стабильно в большинстве металлов, реагирует очень медленно только с водой и щелочами, а также даже при 400° оказывает слабое воздействие на стекло и кварц. В данных отношениях оно очень близко в перхлорилфториду, который обладает похожей плотной и симметричной структурой тетраэдра без реагирующих электронов. Соединение формирует с фторированными олифинами структуры $\text{C}-\text{O}-\text{NF}_2$, а с SbF_5 образуется интересная соль $\text{ONF}_2^+ \text{SbF}_6^-$.

Его возможности в качестве окислителя кажутся похожими на таковые у N_2F_4 , и оно должно быть полезным в дальних космических миссиях.

Ракетные двигатели, предназначенные для работы только в дальнем космосе, обычно разрабатываются со сравнительно малым давлением в камере сгорания – до 10 атмосфер и меньше – и тратят меньше энергии для впрыскивания компонент топлива чем в случае двигателей, созданных для использования на уровне моря, где соответствующее давление обычно составляет около 70 атмосфер (возможно, что в течение нескольких лет этот показатель будет доведен до 175 атмо-

сфер!)⁸. И при условии низкого давления впрыска у двигателей для дальнего космоса некоторые «долгохранимые в космосе» компоненты выглядят особенно привлекательными. Во время перелёта они могут храниться при температуре ниже их точки кипения, затем при приближении момента их использования небольшой источник энергии (маленький электронагревательный элемент или что-то вроде этого) может быть применён для нагревания компоненты до температуры, при которой давление паров будет выше низкого значения давления в камере сгорания и само по себе станет использоваться как источник нагнетания подобно тому, как аэрозольный баллончик распыляет свое содержимое под давлением собственным паров. Тетрафторид диазота, оксидотрифторид азота, также известный как фторид нитрила, FNO_2 , кажется особенно подходящим для применений такого рода. Аэроджет в течение 1963 года с полным успехом проделал большую работу для этих линий топливных компонент.

Хорошей идеей при выборе пары «долгохранимых в космосе» компонент является подбор горючего и окислителя, имеющих одинаковый диапазон температур, при которых они остаются в жидком состоянии. Если эти компоненты хранятся вместе во время многомесячной экспедиции, их температуры всё больше и больше выравниваются, при это не имеет значения, насколько хорошо устроена теплоизоляция. И когда при температуре, к которой стремятся горючее и окислитель, одна из компонент находится в твердом состоянии, а другая в газообразном, то будут иметь место трудности в том момент, когда нужно будет пустить их в дело. Похожим образом, если используется впрыск под действием собственного давления, задача разработки упрощается при условии, что обе части топливной системы обладают довольно близким давлением паров. Так что, если разработчик собирается задействовать ONF_3 с точкой кипения $-87,5^\circ$, то этан, чья температура кипения равна $-88,6^\circ$, будет хорошим выбором в качестве горючего.

Две «долгохранимые в космосе» системы были довольно интенсивно исследованы. RMI и ЛРД, начав в 1963 году или что-то около того и продолжая до 1969 года, отработали систему диборан- OF_2 , в то время как Pratt and Whitney, Rocketdyne и TRW в рамках контрактов с НАСА, которое само также работало над этой темой, сконцентрировали свои усилия на OF_2 и лёгких углеводородах: метане, этане, пропане, 1-бутилене и их разного рода смесях (в большей части своей работы с двигателями они использовали смесь кислорода и фтора в качестве разумного недорогого суррогата для OF_2). Все углеводороды были хорошими горючими, но метан стоял особняком как охладитель, испаряемый или регенеративный, вкупе со своей лучшей эффективностью. Комбинация OF_2 -метан является чрезвычайно многообещающей (признание топлива Винклера из 1930 года заняло много времени!).

Последней частью истории об окислителях, которую я могу поведать без риска нарушения подписки о неразглашении, является сага о «Соединении А». Если я рассказываю её в больших, чем обычно, деталях, то объяснение тому простое. Открытие «А», возможно, является наиболее важным достижением на данный момент для химиков, кто выбрал направлением своей деятельности топлива, история эта хорошо задокументирована и превосходно иллюстрирует не технические,

⁸Прим. перев. В настоящее время в линейке двигателей РД-171/180/191 давление в камере сгорания доходит до 250 атмосфер и выше.

а бюрократические и личные препятствия, которые должны были быть преодолены.

В то время, пока Уолтер Майя проводил эксперименты с электрическими разрядами в 1960-1961 году (изготовив таким образом NF_3 , что никому до этого не удавалось, и пробовал синтезировать штуки вроде N_3F_5), он случайно получил следовые количества двух соединений, с полосами поглощения в 13,7 и 14,3 микрон соответственно в инфракрасном диапазоне. Для удобства он назвал их «Соединение А» и «Соединение Б», после этого был занят другой работой, и Лаутон попросил доктора Ханса Бауэра заняться проблемой идентификации данных соединений. Баур продвигался медленно, но в конце концов получил достаточно А для применения к нему методов масс-спектрометрии и обнаружил, что соединение содержало хлор. Поскольку только азот и фтор были помещены в оборудование, то этот факт потребовал некоторого объяснения, и казалось вероятным, что хлортрифторуглеродная (Kel-F) смазка, использованная в задвижках аппаратуры, попала в зону реакции. Лаутон велел Бауэру (в основном, против его воли) добавить некоторое количество хлора в систему, и очень скоро стало очевидно, что только хлор и фтор были необходимы для изготовления «А». Отталкиваясь от этого факта, а также того, что «А» реагировал с следовыми количествами воды с формированием FClO_2 и принимая во внимание инфракрасный спектр, Лаутон предположил в отчете, представленном в сентябре 1961 года, что «А» был ClF_5 . И именно в это самый момент контракт Rocketdyne (поддержанный Advanced Research Projects Administration — ARPA — и отслеживаемый Office of Naval Research — ONR) был прекращен.

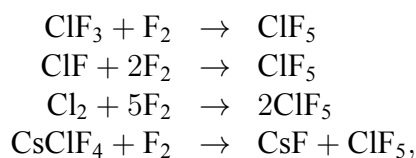
Похоже на то, что кто-то в техасском подразделении Rocketdyne, занимавшимся твёрдым топливом и располагавшимся в нескольких сотнях миль, опростоволосился с секретностью относительно программы ARPA, и доктор Джин Мок из ARPA почувствовал, что что-то должно было быть сделано для перепроверки. Кроме того, он отметил в разговоре с доктором Бобом Томсоном, бывшего начальником Лаутона, что «тот утверждал, что он изготовил ClF_5 , и мы знаем, что это невозможно». Так что проект был заморожен на полгода.

Затем, в районе марта 1962 года, доктор Томсоно выцарапал некоторые деньги компании, предназначенные для НИОКР, и сказал Лаутону, что он наймет двух химиков на три месяца, делая всё, чем тот хотел их занять. Майя был вернут к работе и с помощью Дейва Шиена смог получить достаточно «А» для выяснения приблизительного молекулярного веса. Он составлял 127 — что было сравнимо с вычисленным значением 130,5.

Вооружившись данной информацией, Лаутон снова пришел в ARPA и начал умолять Дика Хотцмана, бывшего помощником Мока. Хотцман вышвырнул его из офиса, что случилось в середине 1962 года.

В это самое время Лаутон участвовал в исследовательской программе ВВС и в отчаянии решил использовать её — а также деньги данной программы — в попытке решить задачу. Проблема была в том, что данная программа не позволяла работать над интергалогенами, но, очевидно, он полагал, что победителей не судят (в старой Королевской Армии Испании была награда для генерала, выигравшего битву, сражаясь вопреки приказа. Разумеется, в случае *поражения* он был бы расстрелян). Филипович в то время был ведущим научным сотрудником Лаутона,

привлек к работе Дика Уилсона, и в течение недели тот пришел к следующему:



и все четыре реакции требовали высокой температуры и давления.

Следующей проблемой стало объяснить всё это ВВС, что не было легко сделать. Когда отчет Rocketdyne прибыл на базу ВВС Эдвардс в январе 1963 года, произошел наброс (биип) на вентилятор. Дон Макгрегор, отслеживавший программу Лаутона, был крайне взбешен и хотел его убить – причем медленно, Форрест «Вуди» Форбс хотел наградить медалью. Имела место потрясающая шумиха, люди непрерывно перемещались от одного рабочего места к другому, и прошло несколько недель, пока все успокоилось. Лаутон был прощен, Дик Холтцман великодушно извинился за ARPA и выдал Лаутону новый контракт, и относительный мир установился в топливном сообществе. И когда я услышал несколько недель спустя об открытии ClF_5 (мы сохраняли кодовое название «Соединение А» ещё несколько лет из соображений секретности), то послал письмо Эмилю, которое начиналось с «Мои поздравления, ты, сукин сын! Всё, чего бы мне хотелось, так сделать это самому!» Он бы необычайно горд собой, что демонстрировал всем в Rocketdyne.

ClF_5 был очень близок к ClF_3 , но для заданного горючего был эффективнее примерно на двадцать секунд. Он кипел при $-13,6^\circ$ и имел плотность 1,735 при 25° . И вся технология, разработанная для обращения с CTF , могла быть применена без изменений и к новому окислителю. Так что просто сказать, что топливное сообщество было полно энтузиазма – значит ничего не сказать.

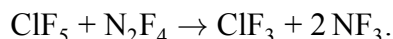
В рамках своего контракта с ARPA и благодаря невероятным лабораторным навыкам Дика Вилсона группа Rocketdyne придумала «Флорокс» – но он до сих пор засекречен, и я не могу о нем говорить без проблем со своей стороны⁹. Но никому еще не удалось получить OClF_5 , который я назвал «Соединение Омега» в силу того, что оно будет практически предельно возможным долгохранимым окислителем. Оно в особенности должно быть полезно с такими горючими, содержащими углерод, как монометилгидразин, CH_6N_2 , с которым будет реагировать, при отношении моль на моль, с образованием $5\text{HF} + \text{HCl} + \text{CO} + \text{N}_2$ – набором продуктов сгорания, которые заставят сильнее биться сердце любого термодинамика. Лаутон со своей компанией пробовали и возможно ещё, что до сих пор пытаются получить это соединение, и доктор Сэм Хэшман и Джо Смит из моей группы охотились за ним в течение более чем трёх лет без всякого успеха, хотя они применили все известные техники синтеза за исключением разве что жертвоприношения девственницы Луне (критическая нехватка исходного материала не позволяет применить указанный метод). Если кто-то и изготовит Омегу, то скорее

⁹Эмиль Лаутон недавно (сентябре 1971 года) дал мне знать, что Флорокс был рассекречен в силу того, что Френчман независимо описал его в 1970 году. Он представляет из себя OClF_3 , и получен путем фторирования Cl_2O или, подумай только, нитрата хлора или ClONO_2 . Его точка кипения равна $30,6^\circ$, и он обладает высокой плотностью 1,852. И так как он содержит кислород, возможно его использование с таким углерод-содержащим горючим как НДМГ.

всего это будет Нил Бартлетт или кто-нибудь из группы Лаутона.

Большое количество работы было проделано со смешанными окислителями, подгоняя состав смеси под соответствие намеченному горючему. Для одного из них NOTS экспериментировал в 1962 году с «Трифлоксом» – смесью ClF_3 , FClO_3 и N_2F_4 , и Pensalt для другого случая исследовал «Халокс», содержащий ClF_3 и FClO_3 . В этом отношении мне кажется, что подходящая смесь ClF_5 и FClO_3 должна быть практически также хороша, как и неуловимая Омега, для сжигания ММГ.

Одна попытка улучшения эффективности ClF_5 путем добавления N_2F_4 неожиданно оборвалась, когда давление паров жидкой смеси (хранимой в стальных баллонах под давлением) начало расти с пугающей скоростью. Видимо, эти два окислителя реагируют следующим образом:



И с этим совершенно ничего нельзя поделать.

Да, кстати... Что касается «Соединения Б». Это оказалась грустная история, и соединением был гексафторид вольфрама WF_6 , по видимому, образовавшийся из вольфрамовой нити накаливания в масс-спектрометре. Даже Лаутон не может выиграть все ставки на свете!

Глава 7

Эффективность

Так как мною говорилось об «эффективности» тысячью (надеюсь) хорошо подобранных слов, может оказаться неплохой идеей объяснить, наконец, в деталях, что имелось ввиду под этим термином.

Целью ракетного двигателя является создание тяги – т.е. приложенной силы. Это делается путём выброса потока газа с большой скоростью, и тяга зависит от двух параметров – отношения, характеризующего выброс газа, выраженного, скажем, в килограммах на секунду, и *скорости*, с которой происходит истечение струи. Умножив данное отношение на величину скорости, можно получить тягу. Таким образом, килограммы в секунду, умноженные на метры в секунду дают тягу в ньютонах (в том случае, если вы разумный человек и работаете в международной системе единиц СИ, или Le Système International d'Unités). Если вам хочется увеличить вашу тягу, то можно либо нарастить поток массы (путем построения большего двигателя) или же увеличить скорость реактивного потока, что, целом, означает поиск лучшей топливной пары. Эффективность данной пары, попросту говоря, и есть выдаваемая скорость реактивной струи.

Иногда люди, не принимающие участие в ракетных делах, спрашивают о, скажем, «мощности» ракеты Сатурн V. Мощность не является особенно полезной концепцией в ракетной технике так как то, что вы пытаетесь передать вашему носителю, есть кинетическая энергия, пропорциональная тяге, умноженной на время, за которое она была приложена. Но если вы определяете мощность как отношение, в котором тепловая или химическая энергия преобразуется в кинетическую истекающего потока газов, имеющее смысл значение может быть вытащено на белый свет. Кинетическая энергия заданной массы истекающих газов (относительно ракеты и, таким образом, не Земли, Луны или Марса) есть $Mc^2/2$, где M является массой и переменная с скоростью (отметим снова, относительно к ракете). И мощность, или степень преобразования энергии, выражается как $\dot{M}c^2/2$, где \dot{M} массовый расход – скажем, в килограммах на секунду. Но, как мы видели выше, $Mc=F$, т.е. равно тяге, так что, соединяя всё вместе, видим, что Мощность = $Fc/2$, и нет ничего проще. Теперь давайте обратимся к Сатурну V.

Сатурн V имеет тягу силой 7.000.000 фунтов, или около 3.400 тонн (не массой, замечу, и разница очень важна). Это равно $33,36 \times 10^6$ Ньютонов (один фунт силы = 4,448 Ньютонов, это единица силы из международной системы единиц. Очень удобно работать в системе СИ, где нет разницы между массой и силой). Я

не помню точное значение скорости истечения двигателей Сатурна V, но этот параметр не должно слишком отличаться от 2,500 метров в секунду. Так что, умножая $33,36 \times 10^6$ на $2,5 \times 10^3$ и деля на два, получаем мощность, явно выраженную в ваттах.

И таким образом вычисленная мощность равна

$$\begin{aligned} & 41.7 \times 10^9 \text{ ватт} \\ \text{или} & 41.7 \times 10^6 \text{ киловатт} \\ \text{или} & 41.7 \times 10^3 \text{ мегаватт,} \end{aligned}$$

что примерно равняется 56 миллионам лошадиных сил. Для сравнения, атомный реактор авианосца *Энтерпрайз*, что является самым мощным из спущенных на воду,¹ генерирует что-то около 300.000 лошадиных сил. И массовый расход топлива в двигателях и истекающих из сопел газах составляет примерно пятнадцать тонн в секунду. Сравнение этого показателя с количеством реагентов в химическом реакторе – каковым двигатель тоже является, весьма впечатляет.

До этого момента всё было просто, но теперь начинаются некоторые сложности. Возникает вопрос «каким образом вы вычисляете скорость истекающих газов с, соответствующим образом расширяющихся в сопле и получаемых для заданной топливной пары, сгорающей при определённом давлении в камере»? Как мы видели выше, энергия заданной массы истекающего газа равна $E = Mc^2/2$. Путем преобразования получаем, что $c = (2E/M)^{1/2}$. Если всё (как мы надеемся) топливо, закачанное в двигатель, превращается в истекающий газ, компонента «М» в данном уравнении также является массой топливных компонент, что производят рассматриваемые истекающие газы. Но E не равна тепловой энергии H исходящего потока газа перед тем, как он расширится. Так что на самом деле $c = (2H/M \times \eta)^{1/2}$, где η есть коэффициент преобразования тепловой энергии в кинетическую, зависящий от давления в камере сгорания, давления реактивного потока, поведения исходящего газа как при сжатии в камере сгорания, так и его изменении при расширении.

Поэтому очевидным образом необходимо знать химический состав газа в камере, что является первым шагом, и вы не можете получить его путем использования простой стехиометрии. Если поместить два моля водорода и один кислорода в камеру, вы *не* получите два моля воды. Разумеется, там будет H_2O , но, кроме того, по причине высокой температуры будет иметь место сильная диссоциация, и станут присутствовать другого рода элементы H , H_2 , O , O_2 и OH . Всего их имеется шесть видов, и вы не можете предварительно знать, в каком отношении они будут образовываться. И для получения решения для шести неизвестных вам нужно шесть уравнений.

Два из них просты, первое выводится из соотношения атомных весов у водорода и кислорода и просто утверждает, что сумма отдельных давлений всех элементов, содержащих водород, умноженных на количество его атомов в составе и затем разделённая на сумму отдельных давлений всех кислород-содержащих компонент, умноженных на количество атомов кислорода в них, представляет собой некое значение, которое вы уже приняли до этого, в данном случае оно равно

¹Прим. перев. В начале 70-ых годов, когда писалась эта книга.

двум. Второе уравнение утверждает, что сумма отдельных давлений всех компонент должно равняться давлению в выбранной камере. Остальные четыре уравнения представляют собой равновесные отношения типа $(H)^2/(H_2)=K_1$, где (H) и (H_2) представляют собой отдельные давления данных компонент, и K_1 суть константа равновесия между ними при температуре в камере сгорания. Это очень простой случай, всё ухудшается по экспоненте при росте количества различных элементов и возможных компонент. С системой, содержащей углерод, водород, кислород и азот, вам может оказаться нужным рассматривать пятнадцать и более соединений. И если вы добавляете некоторое количество бора или, скажем, алюминия и, возможно, немного хлора или фтора – то получаете вынос мозга.

Но вы уткнулись в данное обстоятельство (помните, что я *просил* вас этого не делать) и продолжили движение – и занимались этим в несчастные докомпьютерные дни. Во-первых, вы делаете предположение о температуре в камере сгорания (опыт сильно помогает в данной вопросе!). Затем вы присматриваете подходящие равновесные константы для выбранной вами температуры. Самоотверженные и мазохистски настроенные учёные посвящали годы определению и вычислению данных значений. Эти уравнения теперь лежат перед вами, ожидая решения, и это редко можно сделать напрямую. Так что вы предполагаете особые значения давления того, что, по вашему мнению, будет основными элементами смеси (и замечу снова, что опыт сильно в этом помогает) и вычисляете на этой основе оставшиеся части. Затем вы соединяете все вместе и смотрите, получается ли согласие с определенным заранее давлением в камере. Разумеется, этого не происходит, так что вы возвращаетесь к исходной точке, изменяете первоначальные данные и пробуете снова и снова. И в конце концов, все ваши компоненты оказываются в равновесии, и вы получаете правильное соотношение водорода и кислорода и т.д., и они создают корректное значение давления в камере.

Далее, вы вычисляете количество теплоты, которая требуется для формирования указанных элементов из вашего топлива, и сравниваете это значение с теплотой, что будет необходима для нагрева продуктов сгорания до выбранной вами температуры в камере (те же самые самоотверженные учёные мужи уже включили необходимые значения теплоты формирования и возможности нагрева в свои уравнения). И, само собой, указанные два значения не согласуются друг с другом, так что вы возвращаетесь к исходной точке для того, чтобы выбрать ещё одну величину температуры в камере. И так далее.

Но всё когда-то заканчивается, и, в конце концов, ваш нагрев (теплосодержание) приходит к балансу, ваше равновесие становится согласованным, ваше давление в камере соответствует правильному значению, и у вас имеется правильное соотношение элементов. Коротко говоря, вы знаете условия в камере.

На следующее утро (описанные выше процедуры, возможно, заняли целый день до этого) вы получили решение. Сделаете ли вы вычисления для зафиксированного равновесия или проделаете их для смещающегося равновесного состояния? В случае первого можно предположить, что разложение газа и его теплотворность остаётся неизменной по мере расширения и охлаждения в сопле. Для второго вы считаете, что по мере охлаждения и расширения газов равновесие между компонентами смещается в соответствии с изменениями давления и температуры, так что ни разложение, ни теплотворность истекающего газа не совпадает с тако-

выми в камере сгорания. Первое предположение приводит к утверждению, что скорости всех реакций равны нулю, второе влечёт бесконечность этих значений, и оба предположения явно являются ложными.

Если вам необходимо получить консервативное значение, вы выберете вычисление с установившимся равновесием (оно дает меньшее значение, чем в случае расчета с смещающимся равновесием). И вы добавляете данные из расчета для камеры сгорания в следующую устрашающего вида формулу:

$$c = \left\{ 2 \frac{R\gamma}{\gamma - 1} \frac{T_c}{\bar{M}} \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_c} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\}^{1/2}$$

В данном случае R есть универсальная газовая константа, γ равно соотношению C_p/C_v для выбранных теплот газов в камере. \bar{M} является средним молекулярным весом для данных газов, T_c температурой в камере, P_e и P_c давлением в исходящем потоке и камере соответственно. Данная формула выглядит запутанной, каковой она на самом деле и является, но её можно упростить как

$$c = \left[2H/\bar{M} \right]^{1/2} \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_c} \right)^{R/C_p} \right]^{1/2}$$

где H сумма теплосодержаний всех присутствующих элементов (отсылка к нулевому теплосодержанию делается для идеального газа при абсолютном нуле). « \bar{M} », конечно же, является массой всех топливных компонент, что производят эти элементы. И эффективность η есть

$$1 - \left(\frac{P_e}{P_c} \right)^{R/C_p}$$

Если у вас оптимистичное настроение – и вы полны энергии – то выполняются вычисления со смещающимся равновесием. Оно базируется на предположении, что хотя газовый состав будем меняться во время процесса расширения, энтропию это не затронет. Так что следующим шагом будет суммирование значений энтропии всех частей в камере, и запись этого значения на листке бумаги, что не позволит вам его забыть (величины энтропии тоже приведены в сборниках значений). Далее, вы предполагаете температуру исходящего потока при выбранном вами давлении последнего и затем определяете состав исходящего газа тем же самым образом, что и для камеры сгорания, добавляете значения энтропии и сравниваете их с показателями в камере. А затем пробуете еще одну величину температуры в камере и т.д. В конце концов вы выводите условия для исходящего потока и можете вычислить теплосодержание на единицу массы. И затем окончательно получаете $c = \left[\frac{2(H_c - H_e)}{\bar{M}} \right]^{1/2}$, $\eta = (H_c - H_e)/H_c$.

Твёрдые и жидкие продукты в исходящем потоке отчасти усложняют процесс при своём появлении, но в общая идея работает. Нет ничего сложного в её отношении, но конкретные применения являются невыносимо утомительными. И мне всё ещё известны люди, выполнявшие вычисления значения эффективности в течение двадцати лет и по-прежнему, по видимости, остающиеся в здравом уме!

Время и усилия, затраченные на «точные» вычисления значений эффективности, имели два вполне предсказуемых последствия. Первым было то, что данные вычисления, которые *были* выполнены, ценились подобно чистому золоту (для вычислений смещенного равновесия можно заменить золото на платину), а также распространялись, компилировались и собирались про запас всеми, кто как-то приложил к ним руку. Вторым следствием стало требование от всех вокруг приближенного или упрощенного метода. И они быстро были предоставлены в значительном количестве.

Наиболее проработанные варианты методов представляли собой диаграммы Моля для продуктов сгорания различных топливных комбинаций. На них обычно откладывали теплотворность по одной оси и энтропию по другой с изотермами и изобарами, пересекающими диаграмму. Типичный набор диаграмм содержит продукты сгорания для реактивного горючего при различном количестве кислорода. Ещё одна диаграмма представлена продуктами разложения 90-процентного пероксида, другая содержит аммиак и кислород для различных отношений окислителя и горючего. Некоторые диаграммы были более общего толка, будучи применёнными к определённой смеси атомов углерода, кислорода, водорода и азота без указания на первоначальный состав топлива. Данные диаграммы были просты в использовании и давали результаты быстро, но редко применялись к *совершенно* той же самой топливной комбинации, что вы держали в уме. Также данные диаграммы были очень сложны в построении, задействовав дюжины вычислений различного рода. Агентство Bureau of Mines, имевшее обширный опыт обращения с задачами сгорания, являлось лидером в данной области.

Более общий, но менее информативный метод был разработан в 1949 году Хоттелом, Саттерфилдом и Уильямсом из МИТ. Он мог применяться к практически любой комбинации в системе CHON, но его использование для любого давления в камере сгорания выше 20 атмосфер или любого давления исходящего потока, отличающегося от одной атмосферы, становилось запутанной и сложной процедурой. Позже я модифицировал и упростил данный метод, сделал некоторые дополнения для других элементов и опубликовал эти результаты в 1955 году в «NARTS Method of Performance Calculation».

Вышеуказанные и похожие методы включали, разумеется, интерполяции между аккуратно рассчитанными системами и давали весьма неплохое приближение для результатов расчетов смещающегося равновесного состояния.

Другая группа методов выдавала, в общем, примерно те же результаты, что и вычисления с установившимся равновесием, и базировались на уравнении $c = (2H/M \times \eta)^{1/2}$. Обычным было определение H путем игнорирования всех малых продуктов (предполагая, что не имела место диссоциация). Продуктами в системе CHON считались CO₂, H₂O, CO, H₂ и N₂. Как только равновесное состояние газ-вода было найдено (что могло быть сделано с использованием равновесной константы для некой произвольной температуры, например 2000K или любой другой, выбранной по прихоти оператора – что не имело особого значения)² значение H могло быть определено путём простого вычисления. Что же до η , то даже

²Рассмотрим случай, когда реагируют одна молекула O₂, одна H₂ и атом C. Если реакция привела к H₂O + CO, значение эффективности будет отличаться только на 2,5 процента от таковой для CO₂ и H₂. И это в самом плохом случае!

имея небольшой опыт, вы можете сделать довольно неплохую прикидку, и любая допущенная ошибка будет усреднена в процессе взятия вами квадратного корня от предположенной величины! Или же, если вы хотите показаться причудливым, можно определить среднюю величину C_p для ваших газов как примерно равную, по вашей мысли, возможной температуре в камере сгорания, и воткнуть её ту часть уравнения, что отвечает за эффективность. Метод Тома Рейнхарда от 1947 года включал в себя температурные кривые vs теплосодержание для различных истекающих газов так же, как и C_p vs температура. Данная температура, разумеется, была слишком высокой в силу игнорирования дистилляции. Десять лет спустя я изменил указанный метод, устранил кривые, создал быстрый и лёгкий путь получения R/C_p , усреднённого против целого диапазона температур, и предоставил номограмму для вычисления η из этого значения и соотношения давления. Метод получил название NQD – NARTS Quick and Dirty (NARTS наспех сварганенный). Эта штука работала изумительно хорошо, выдавая результаты, соответствующие вычислениям для полностью смещающегося равновесного состояния (по моему предположению, тут помогло усреднённое отношение R/C_p) с точностью примерно в 1 процент, и вы можете провести вычисления в течение пятнадцати минут. Это также наилучшим образом работало тогда, когда вы постулировали простейший – в действительности, наиболее бесхитростный – набор продуктов, что можно было только и вообразить. И к тому же метод мог настраиваться, что я выяснил, когда однажды меня посетил человек из Callery Chemical Co. и впервые рассказал о системе BN. В ней продуктами истечения являются водород и твердый BN, я вытащил свои таблицы после его рассказа об этом и, сделав предположение, что два атома углерода (графита) ведут себя также, как и молекула BN, провел быструю оценку. И невероятно, но моё значение было в пределах погрешности, равной половине процента от того, что этот парень получил путем хитроумных машинных вычислений. Одной только лишь проблемой с данным методом было то, что я не мог сохранить копию для себя самого, некий тип всегда выпрашивал мой последний экземпляр, и я потерял ещё порядка пятидесяти или что-то около того результатов вычислений.

Были разработаны и другие приближенные методы, некоторые из них не позднее 1963 года, но все они были близки к описанным мною выше. Но дни таких сокращенных методов прошли – так же как и, слава Богу, время полностью ручных вычислений.

Компьютеры начали выходить на сцену в начале 50-ых, хотя и значительная химическая смекалка была необходима для использования большинства их первоначально довольно ограниченных возможностей. В Bell Aerosystems рассматривали фтор в качестве окислителя и смесь гидразина и метанола в роли горючего и запросили вычисления эффективности. Программист протестовал, что он не может сделать расчет для такого большого количества элементов, и тогда Том Рейнхардт резко возразил, что «углерод и кислород приведут с CO, и ты просто сообщишь маленькому человечку, что живет внутри этого ящика, что угарный газ может рассматриваться также, как и азот». Что решило все проблемы.

Термодинамические данные были собраны на перфокартах, универсальные программы, которые могут иметь дело с дюжиной и более элементов, записаны на ленту, и всё стало гораздо проще, чем до этого. Но химическая смекалка

ка всё ещё полезна также, как и немного здравого смысла в процессе интерпретации распечатанных результатов. В качестве примера первого можно привести вычисления, выполнявшихся годами для систем, содержащих алюминий, с использованием термодинамических данных для газообразного Al_2O_3 , полученных из предполагаемого давления для этого оксида. И результаты не слишком хорошо согласовывались с экспериментом. И затем неосмотрительный исследователь доказал, что газообразный Al_2O_3 попросту не существует, в результате чего все вокруг покраснели. В качестве следующего примера рассмотрим случай топливной комбинации, что производит много твердого углерода, скажем, в исходящем потоке. Машина выполняет свои вычисления в рамках предположения, что углерод находится в полном термическом и механическом равновесии в газообразной части струи. Небольшие соображения общего рода приводят к предположению, что это на самом деле не так в силу того, что перенос тепла не является бесконечно быстрым процессом, и указанный углерод может быть выброшен, будучи значительно горячее окружающего газа. Так что вы смотрите на распечатанные результаты со значительным пессимизмом – и ждёте результаты эксперимента перед тем, как согласитесь с самим собой.

Большое количество усилий в последние годы было потрачено на попытки разработки программ, принимающие во внимание перенос тепла от твердых компонент к газу и предоставляющие реальную скорость изменений в истекающем соединении при расширении. Данные программы были названы «кинетическими» в противоположность программам для фиксированного или сдвигающегося равновесия, и только мощные компьютеры дали возможность их создать. Существует только лишь одна проблема – надежные кинетические данные найти также тяжело, как и честного члена городского управы, и когда вы скормливаете машине неточные данные, некорректные результаты выходят с другого конца. Как говорят ребята-компьютерщики – «Мусор на входе – мусор на выходе».

И имеется одно разочаровывающее обстоятельство при работе с компьютером – он, скорее всего, вам возразит. Вы делаете крохотную ошибку в вашей программе на языке ФОРТРАН – скажем, вносите символ в неправильную колонку или пропускаете запятую – и 360-ый³ со скрежетом останавливается и выводит грубые замечания типа «НЕПРАВИЛЬНЫЙ ФОРМАТ», или «НЕИЗВЕСТНАЯ ПРОБЛЕМА», или в случае, когда человек, написавший программу, чувствовал себя утром на самом деле тяжело, «ЧТО ЗА ЕРУНДА? НЕ МОГ ПРОЧЕСТЬ?». Все, кто часто использовал компьютеры, время от времени испытывал дикое желание напасть на этот сверхбыстрый абак с топором.

Эффективность ракеты обычно не декларируется в терминах скорости истечения, хотя ранние специалисты использовали данные понятия. Вместо этого определяется «удельный импульс», для которого скорость истечения поделена на стандартное ускорение свободного падения, равное 9,8 метрам или 32,3 футам в секунду². Это понятие выдает значения удобного размера в диапазоне от 200 до 400 или около того, но оно приводило к некоторым другим мучительным, если не абсурдным, определениям. Наиболее распространённым является то, где удельный импульс есть тяга, разделённая на массовый расход топлива, и оно выдается в

³Прим. перев. Автор имеет в виду IBM System/360, чрезвычайно популярную в 60-ых линейку компьютеров, скопированную в СССР под маркой ЕС ЭВМ.

секундах. Добавление ускорения свободного падения в уравнение позволяет этого добиться, но указание эффективности ракеты, чьей главной работой является убратся прочь от Земли, в терминах ускорения свободного падения на поверхности данной планеты кажется для меня местечковой, если не дурацкой, процедурой (немцы во время Второй Мировой Войны использовали даже более глупую единицу измерения эффективности, а именно «удельное потребление топлива», что есть обратная величина для удельного импульса. Она даже не имела той положительной черты, как выдача значений удобного размера, вместо этого появлялись штуки вроде 0,00426 в секунду).

Возможно, что лучшим способом понимания удельного импульса является выражение его в качестве скорости, но не в метрах или футах в секунду, а в единицах 9,8 метров (или 32,2 футов) в секунду. Таким путём вы остаётесь в рамках концепции массового расхода, что *является* соотносящимся со всем и не зависит от местных особенностей одной конкретной планеты, и в тоже время позволяет европейским и американским инженерам понимать друг друга. Когда такой инженер слышит $I_s=250$, европеец умножает на 9,8 для получения скорости истечения, в то время как американец делает тоже самое с 32.2 и приходит к футам на секунду (*Когда же наконец США сменяют свою систему измерения на международную?!*)

Я показал вам, чем является эффективность и описал, каким путем можно её вычислить, но теперь возникает практического толка задача выбора топливной пары, дающей хорошую эффективность. В этом случае будет очень полезным вернуться к уравнению скорости $c=[2H/M]^{1/2}[1 - (P_e/P_c)^{R/C_p}]^{1/2}$, и рассмотреть член H/M и ту часть, что отвечает за эффективность, отдельно. Очевидно, что вы желаете сделать H/M насколько только возможно большим, и для того, чтобы добиться этого, полезно рассмотреть истекающие газы, которые вы надеетесь получить. Энергия, внесенная молекулой продуктов сгорания равна теплоте формирования данной молекулы из её составляющих при 25°C плюс разумная теплота выше уровня абсолютного нуля (которая является очень малой добавкой) *минус* энергия, требуемая для разложения при 25°C на отдельные элементы формирующего их топлива. Последняя компонента обычно гораздо меньше первой – в противном случае мы не будем иметь дело с удобным топливом. И иногда она является отрицательной; когда один моль гидразина разлагается на водород и азот, мы получаем двенадцать килокалорий в качестве бесплатного бонуса. Но важным элементом становится теплота образования молекулы продукта, которую мы хотим иметь насколько это только возможно большой. И, очевидно, для максимизации H/M мы должны минимизировать M . Так что для получения хорошей компоненты, отвечающей за энергию, необходима молекула в истекающем потоке с высокой теплотой формирования и низким молекулярным весом.

Пока неплохо, но давайте теперь взглянем на член, отвечающий за эффективность. Очевидным образом, желательно получить его как можно более близким к 1,0, что означает максимально возможное уменьшение $\left(\frac{P_e}{P_c}\right)^{R/C_p}$. Отношение P_e/P_c , само собой, меньше единицы, так что нам нужно максимально увеличивать значение степени R/C_p . Это, разумеется, означает, что нужны продукты истечения с настолько низким C_p , какое мы можем вообще найти. И, следовательно, мы ищем продукты сгорания, которые имеют

- а. Высокую теплоту образования
- б. Низкий молекулярный вес
- в. Низкий C_p .

Увы, такой образец совершенства среди продуктов истечения сложно получить. В общем, если у вас имеется хороший элемент H/M , то член R/C_p является плохим, и наоборот. И если обе компоненты хороши, температура в камере сгорания может быть неудобно высокой.

Если мы рассмотрим конкретные продукты истечения, то получается следующее: N_2 и твердый C практически бесполезны в качестве источника энергии, HCl , H_2 и CO неплохи⁴, в то время как B_2O_3 , HBO_2 , OBf , BF_3 , H_2O и HF также как и твердые B_2O_3 и Al_2O_3 превосходны в этом отношении. Когда же мы рассмотрим C_p , порядок, в котором располагаются соединения, начинает довольно сильно отличаться. Диатомные газы с значением C_p выше 0,2 ведут себя замечательно. Они включают в себя HF , H_2 , CO , HCl и N_2 (конечно же, моноатомный газ имеет C_p , равный 0,4, но нахождение химической реакции, производящей в больших количествах горячий гелий далеко выходит за рамки разумной политики). Трёхатомные газы H_2 , OBf и CO_2 с C_p от 0,12 до 0,15 неплохи, четырехатомные молекулы HBO_2 и BF_3 с отношением 0,1 ужасны и B_2O_3 – ну, тут, возможно, лучше вообще помолчать. Что же до твёрдых C , Al_2O_3 и B_2O_3 , то значение их C_p в точности равно нулю, что было бы тепловой эффективностью в том случае, если бы только они и содержались в истекающей струе.

Столкнувшись с такой ситуацией, любой ракетчик может начать искать разумный компромисс. Он будет по мере возможности выбирать чистый водород в качестве своего истекающего газа в силу того, что при любой заданной температуре один грамм водорода обладает большей тепловой энергией, чем у любой другой молекулы вокруг (один грамм H_2 при 1000 К имеет почти в десять раз больше запасённой энергии, чем грамм HF при той же температуре), и его великолепный показатель C_p делает возможным использование большой доли данной энергии для реактивного движения. Так что водород является идеальной рабочей жидкостью, и вы всегда стараетесь добавить его как можно больше в свою смесь. Это должна быть именно смесь (по крайней мере, в химический ракетах) так как вам нужен источник энергии некоторого рода для нагрева данного водорода до 1000 К или 3000 К или что-то вроде этого. И одним лишь только таким доступным источником является сжигание некоторого количества водорода. Так что вы привносите часть кислорода или фтора в картину для сгорания части водорода до H_2O или HF , повышения температуры до 3000 К или около того, и ваш истекающий газ есть смесь H_2O или HF с избытком водорода. Когда водород является горючим, он всегда вносится в избытке и не дожигается полностью до воды или плавиковой кислоты. Если бы так делалось, то температура в камере сгорания была бы неприятно высокой, и значение C_p смеси снижалось бы, вызывая уменьшение эффективности. Водород настолько лёгок, что значительный его избыток

⁴Классификация водорода в качестве хорошего источника энергии несмотря даже, что естественно, на нулевую теплоту образования, объясняется тем фактом, что его молекула очень легка. При 25° он имеет удельную теплоту, или содержание теплоты, равную 2,024 килокалории на моль выше абсолютного нуля, и так как его молекулярный вес равен только лишь 2,016, то и соотношение H/M даже при комнатной температуре примерно равно 1,0 ККал/гр.

не сильно вредит члену Н/М, и вы получаете максимальную производительность, в общем случае, используя только лишь такое количество кислорода или фтора, что необходимо для сжигания от силы половины вашего горючего.

Если вы сжигаете углеводород с кислородом, или если вы работаете с системой CHON в целом, то в общем случае получаете максимальную эффективность в случае соотношения компонент, где содержание окисляющей валентности в камере сгорания снижено до нахождения в диапазоне от 1,05 до 1,20 – т.е. вы работаете при небольшом избытке горючего в стехиометрии для получения некоторого количества СО и H_2 в смеси и улучшения C_p (термины «обогащенный» и «обедненный» в ракетных делах означает совершенно то же самое, что и для карбюратора).

Если же вы используете галогеновый окислитель с долгохранимым горючим, наилучшие результаты обычно показываются при таком соотношении в вашей смеси, что количество атомов фтора (плюс хлор, если он присутствует) в точности равно количеству атомов водорода. Если же в состав смеси входит углерод, хорошей идеей является добавление в систему в нужном объёме кислорода для сжигания горючего до СО, так что вы не получаете никакого твердого углерода в истекающем струе. И если ваш источник энергии находится в твёрдом или жидком состоянии при температуре истекающего потока – например, BeO , Al_2O_3 – то становится необходимым, само собой, набивать в смесь водород в максимальном количестве.

Это только несколько обстоятельств, которые топливный химик должен принять во внимание в процесс поиска наилучшей эффективности. И получение топливной комбинации, которая будет работать так, как этого хотят инженеры, является тем, за что ему платят. Причем недостаточно.

Вот как всё происходит: группа инженеров получает задание разработать новую ракету поверхность-воздух. Заказчиком указано, что она должна работать при любой температуре, что возможна во время боевых операций, и максимальные размеры ограничены таким образом, что могут использоваться существующие пусковые установки. Ракета должна быть ампулизована на заводе для того, чтобы не иметь дело с топливом при непосредственной эксплуатации, и она не должна оставлять видимого следа, облегчающего её перехват. И, конечно же, должна иметь место гораздо более высокая эффективность, чем для существующих систем, сжигающих кислоту-НДМГ (возможно, что заказчик предъявит дюжину дополнительных условий, в большинстве своем невыполнимых, но начнем мы без них).

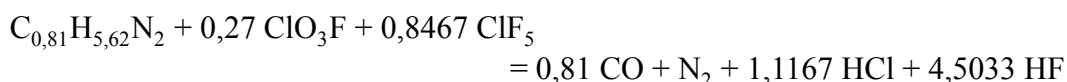
Со своей стороны, инженеры, перед тем как усесться за чертёжные доски, требуют у топливного химика, чтобы он выдал топливную комбинацию, позволяющую ракете делать то, что запрашивает заказчик. Также они добавляют несколько своих невыполнимых требований.

После чего химик уползает в свою нору для анализа материала. Что он собирается предложить, так это пару гидразин-пентафторид хлора (по историческим причинам ClF_5 обычно называется «соединением А»). Она имеет наивысшую эффективность для любой практичной долгохранимой комбинации из известных (все продукты сгорания содержат два атома, и $\frac{2}{3}$ из них является HF), и её плотность вполне прилична, так что можно заправить большое количество в маленький бак. Но химик помнит об ограничении всепогодности, и напоминает сам себе,

что невозможно предсказать, где будут происходить боевые действия, и точка замерзания гидразина некоторым образом несовместима с климатом Баффиновой Земли. Так что следующим лучшим кандидатом является, возможно, МНФ-13 – смесь 14-86 гидразина и метилгидразина с эмпирической формулой $C_{0,81}H_{5,62}N_2$, чья точка замерзания падает до волшебных -54° (имеются и другие возможные горючие, но он могут быть отчасти опасными, и химику *известно*, что МНФ-13 безопасен и работает). Но с ClF_5 МНФ-13 будет оставлять чёрный дымный след, указывающий прямо на место старта – что определенно нежелательно, если экипаж собирается прожить достаточно долго для произведения второго пуска. Кроме того, душа профессионала (это одна лишь только и душа, что осталась после всех лет, проведенных в данной области) подводит к мысли о свободном углероде, его эффекте, оказанном на C_p , и как все это повлияет на эффективность.

Так что химик решает «прокачать» свой окислитель небольшим количеством кислорода для обработки углерода, что означает добавление долгохранимой компоненты, содержащей кислород. Единственным кандидатом, что может сосуществовать с соединением А является перхлорилфторид, или «ПФ», который и выбран.

Нашему ученому известно, что если имеется углерод и водород в системе наряду с кислородом, фтором и хлором, то обычно вы получаете наилучшую эффективность тогда, когда кислород и углерод сбалансированы до CO , а водород и галогены до HF и HCl . Так что химик немного чиркает на бумаге и приходит к уравнению:



Что выглядит хорошо – имеется много HF и, следовательно, большое количество энергии. И ничего, кроме двухатомных газов в истекающем потоке, означающее хорошее значение C_p , в свою очередь влекущее отрадно высокую долю данной энергии, потраченную на процесс реактивного движения. Для нахождения данной доли наш химик собирает свои заметки и оплачивает звонок IBM 360. Результаты данной консультации благоприятны, так что он преобразует свои доли моля в весовые проценты и звонит инженерам.

«Вашим топливом является МНФ-3», анонсирует химик, «и окислителем 80 процентов 'А' и 20 ПФ. И соотношение окислитель/горючее равно 2,18. И Маттонхид говорит –» «Что за Маттонхид?» «Это компьютер такой. Он говорит, что удельный импульс при 1000/14,7 фунтах равен 306,6 секундам, и Я говорю, что если вы не сможете выловить показатель 290 на тестовом стенде, вы и вполонину не так хороши, как о себе рассказываете. Но следите за вашим соотношением окислитель/горючее. При отклонении эффективность резко уменьшится, и если вы допустите обогащение смеси, то прогорите как дураки: плотность равна 1,39 и температура в камере сгорания 4160К. Если вам нужно значение в Фаренгейтах, то конвертируйте его сами!»

И потом химик быстро залегает в свою берлогу, преследуемый проклятиями инженеров, которые (а) протестуют, что плотность слишком низка и (б) температура в камере сгорания слишком высока, и, вообще, кто-то когда-нибудь слышал о ком-то, работающим с таким значением? (с) требуют что-то сделать с токсичностью ClF_5 . На что он отвечает, что (а) ему самому бы хотелось иметь более

высокую плотность, но он химик, а не теолог, и по поводу изменений свойств соединения вы должны проконсультироваться с Господом Богом; (б) для получения высокой эффективности вам необходима энергия, что означает высокую температуру в камере сгорания, и до тех пор, пока вы не удовлетворены КДАК и НДМГ, нужно воспринять все как есть, и по поводу пункта (с) смотри пункт (а).

И затем в течение следующих шести месяцев или что-то около того химик постоянно занят, отвечая в ответ на протесты:

«Нет, вы не можете использовать О-кольца из бутиловой резины с окислителем! Вы собираетесь оторвать себе голову?»

«Нет, вы не можете использовать их с горючим также. Они развалятся на части.»

«Конечно же, соотношение в вашей смеси нарушится если вы поместите почти двадцать литров окислителя в двухсотлитровый бак! Большая часть ПФ испарится в незаполненном объеме, и большая часть А уйдет вниз на дно бака. Используйте бак меньшего размера.»

«Нет, не существует такой добавки, что я мог бы поместить в окислитель для снижения давления паров ПФ.»

«И нет, я не могу отменить первый закон термодинамики. Вам следует обратиться в Конгресс!»

И наш химик тоскливо предается мечтам, где он ныряет в холодный мартини – и удивляется, зачем он вообще полез в эту область.

Глава 8

Жидкий кислород, его смесь с фтором и криогеника в целом

В то время, как происходили вышеописанные события, жидкий кислород всё ещё играл очень важную роль. Метеорологическая ракета Викинг сжигала его с этиловым спиртом подобно А-4, тоже самое делалось несколькими экспериментальными носителями в начале 50-ых и ракетой Редстоун. Большинство из них также использовали пероксид водорода в качестве вспомогательного источника энергии, примененного ещё в А-4, для привода турбин и т.п. Первый сверхзвуковой самолет Х-1 разгонялся с помощью двигателя RMI на жидком кислороде и спирте.

Были опробованы и другие спирты в качестве горючего для кислорода – ЛРД проделала это для метанола не позднее 1946 года, изопропанол был испытан North American в начале 1951 года – но все они не показали особого преимущества над этанолом. То же самое имело место для диметоксиметана $\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{OCH}_3$, в случае которого на Винтернитца из RMI во многом вопреки его желанию оказывалось давление с целью проведения испытания в начале 1951 года (и он знал, что это было большой глупостью). Похоже на то, что его босс дружил к кем-то, у кого было на руках много диметоксиметана, и единственным возможным найденным применением было сами можете догадаться что. И в NARTS мы провели некоторые исследования для Принстона, используя жидкий кислород и чистый питьевой спирт от компании USP, не бывший при этом денатурированным. Одним лишь только найденным нами отличием была повышенная степень испарения данного продукта по сравнению с денатурированным в процесс открытия моряками емкости с целью замера плотности. У нас было несколько очень счастливых флотских во время выполнения программы.

Но требовалось нечто более мощное, чем спирт, для приведения в реактивное движение суперзвукового самолёта Х-15. Вначале был выбран гидразин, но он иногда взрывался в процессе регенеративного охлаждения, и когда программа обдумывалась в 1949 году, он в любом случае имелся в недостаточном количестве с учётом всех возможных источников. Боб Труа из ВМФ наряду с Уинтернитцем из Reaction Motors, разработавшим двигатель тягой в 22,65 тонны, остановился на аммиаке как на достаточно разумном выборе в качестве второго по производительности горючего. Кислород-аммиачная пара была прожжена ЛРД, но в дей-

ствительности RMI отработала её в начале 50-ых. Высокая стабильность молекулы аммиака приводила к сложностям с зажиганием, и с самого начала разработчиков преследовал злой рок с жестким горением и нестабильностью процесса. Были опробованы всевозможные добавки к горючему, включая метиламин и ацетилен, в надежде уменьшить сложности. Двадцать два процента последнего приводило к гладкому сгоранию, но такая смесь была опасно нестабильна и не использовалась в течение продолжительного времени. Проблемы сгорания в конце концов были решены путем улучшения конструкции форсунок, но это был долгий и шумный процесс. Ночью я мог слышать, как работает двигатель на расстоянии в 16 километров, будучи отделенным двумя группами холмов от места испытания, и мог сказать, насколько далеко продвинулся процесс отработки форсунок только лишь путем восприятия производимого звука. Даже когда двигатель в конце концов заработал положенным образом, и первая партия была готова к отправке на Западное Побережье США для испытаний в лётных условиях Скотом Кроссфилдом, все держали пальцы скрещёнными. Луи Рапп из RMI, летя через континент, обнаружил рядом хорошо информированного соседа, который, что было само собой разумеющимся в аэрокосмической отрасли, спросил его мнение о двигателе. Луи выругался и объявил с соответствующими жестами, что это было механическое чудовище, что происшествие было только лишь вопросом места и времени, и что лично он рассматривал такого рода полёты всего лишь как дорогой метод самоубийства. Затем, вспомнив что-то, он повернулся к своему собеседнику и спросил – «Да, кстати, я не знал вашего имени. Не подскажите его?»

Ответ был прост – «О, меня зовут Скотт Кроссфилд».

Нашими первыми настоящими БРСД были Тор и Юпитер, и они были разработаны для сжигания кислорода и JP-4. Их турбины приводились в движение продуктами газогенератора, работавшего на тех же самых топливных компонентах, но с сильно обогащенной смесью для выработки газов, которые не могли бы расплавить лопатки турбины. У JP была лучшая эффективность, чем у спирта, и избавление от пероксида упрощала всю систему.

Но в этом направлении имелись проблемы. Размытые спецификации для JP-4 приводили к мучениям для инженеров. Керосин мог сгорать совершенно нормально и выдавать положенную эффективность – но в охлаждающем контуре он имел тенденцию к полимеризации (вы должны помнить, что стандарт позволял высокое содержание олефинов) в форме смолистых образований, что замедляли поток топлива, а это немедленно приводило к прогоранию двигателя. В газогенераторе же откладывались нагар, кокс и другие смешанные соединения, что полностью делали всю систему неработоспособной. И, само собой, не было и двух бочек с похожим керосином (и, верите или нет, в них размножались бактерии, выделявшие осадок!).

Но нужна была эффективность углеводородов, спирт же её не выдавал. Так что же оставалось тогда делать?

В конце концов кто-то наверху засел и обдумал данную задачу. Спецификации JP-4 были настолько общими, насколько это гарантировала большие поставки керосина при любых обстоятельствах. Но Юпитер и Тор была разработаны и предназначались для того, чтобы быть носителями ядерных боеголовок, и человека, размышлявшего об этом, осенило, что нет необходимости в больших и непрерыв-

ных поставках горючего для такого рода ракет. Каждый носитель запускается, если это вообще происходит, один раз, и после того, как несколько их дюжин оказали давление на участвующие в прениях стороны, проблема горючего для одной из них становится академической ввиду смерти всех заинтересованных. Так что единственным условием становится правильная работа ракеты в самый первый раз – и вы можете сделать спецификации настолько узкими, насколько желаете этого. Ваша первая заправка является единственно только и необходимой.

Результатом всего этого стал стандарт для RP-1, выпущенный в январе 1957-го года. Нижним пределом для точки замерзания было -40° , максимальное содержание олефинов ограничено 1 процентом и для ароматики установили предел в 5 процентов. При поставках эти значения обычно были лучше, чем формально описано в стандарте: керосин в области C_{12} с соотношением Н/С в районе между 1,95 и 2,00, содержащий около 41 процента нормальных и разветвленных парафинов, 56 процентов циклопарафинов, 3 процента ароматики при полном отсутствии олефинов.

Проблему полимеризации и коксования, таким образом, решили, но Мэдофф и Сильверман из Рокетдайна (бывшее автономным подразделением, образованным North American для выполнения всех ракетных работ) не были совершенно счастливы с данным решением и провели интенсивные экспериментальные работы с диэтилциклогексаном, который, не будучи чистым соединением, являлся отлично воспроизводимой смесью изомеров, к тому же, простой в производстве. Результаты экспериментов были блестящими, горючее значительно превосходило RP-1, но не применялось в летавших ракетах. Атлас и Титан I, что являлись нашими первыми МБР, были разработана для RP-1 до ещё работ Мэдоффа и Сильвермана, а Титан II использовал долгохраняемые компоненты. Двигатель F-1 Сатурна V сжигал жидкий кислород и RP-1¹.

Кислородные двигатели обычно работают при высоких температурах, и тепло переносится к стенке с фантастической скоростью. Это с самого начала было проблемой даже при применении регенеративного охлаждения, но весной 1948 года экспериментаторы в General Electric пришли к замечательному решению. Они добавили 10 процентов силиката этила к своему горючему, что было, в их случае, метанолом. Данный силикат имеет замечательное свойство, разлагаясь при высоких температурах и формируя слой диоксида кремния, работавшего как изолятор и снижавший перенос потока тепла. И, хотя, этот слой постоянно испарялся и уносился со струей газов, он также непрерывно продолжал откладываться. Спустя три года также в GE Муллани добавил 1 процент силиконовой смазки GE в изопропанол и снизил уровень переноса тепла на 45 процентов. Двигатель GE для первой ступени ракеты Вангард использовал такой тепловой барьер. Уинтернитц в RMI получил похожего рода результаты в 1950 и 1951 году с силикатом этила в

¹ Жидкий кислород и RP-1 не сгорают совершенно без остатка, и всегда имеется немного свободного углерода в истекающей струе, что приводит к яркому пламени. Так что когда вы смотрите ТВ, видите подъем ракеты на мысе Канаверал – или то же самое для Байконура – и выбрасываемое пламя очень яркое, можете быть уверены, что топливом являются жидкий кислород и RP-1 или его эквивалент. Когда же пламя почти невидимо, и вы можете наблюдать скачки уплотнения в истекающей струе, возможно, что вы смотрите запуск носителя Титан II, сжигающего N_2O_4 и Аэрозин 50-50.

этаноле и диметоксиметане, и в 1951 году с 5 процентами данного соединения в аммиаке ему удалось снизить уровень переноса тепла на 60 процентов.

Ещё одной хитрой проблемой с кислородными двигателями был их запуск. Начиная с А-4 и вплоть до Тора и Юпитера пиротехнический старт являлся обычным делом, но это было значительным усложнением с низкой надежностью. Зангер использовал инициатор из диэтилового цинка, и Bell Aerosystems превзошла его путем применения триэтилового алюминия для запуска двигателей на кислороде-RP-1. Запечатанная ампула, содержащая смесь 15 процентов триэтилалюминия и 85 процентов триэтила бора, раздавливалась давлением топлива в магистрали при запуске, реагировала с самовосламенением с жидким кислородом, и вы получали результаты работы. Все это было просто и очень надежно.

Спирт, аммиак, JP-4 или RP-1 были горючими, обычно сжигаемыми с ЖК, но практически любая доступная возгораемая жидкость была экспериментально опробована в тот или иной момент. RMI, к примеру, проверила циклопропан, этилен, метилацетилен и метиламин. И ничто из этого списка не имело особых преимуществ по сравнению с обычными видами топлива. Гидразин был испытан не позднее 1947 года (в Bureau of Aeronautics, EES, Annapolis), и НДМГ опробован Аэроджет в 1954 году. Но в США в отличие от СССР комбинация гидразинового горючего и жидкого кислорода не была распространена. Одним лишь только широкомасштабным примером использования были Юпитер-С и Джуно-1, приводимые в движение усовершенствованными двигателями Редстоуна, переработанными для сжигания Нудyne вместо спирта (Нудyne является смесью 60-40 НДМГ и диэтилентриамин, разработанной Рокетдайн).

Идеальным топливом Циолковского был, конечно же, жидкий водород. Он, естественно, бесполезен в боевых ракетах (в силу настолько низкой плотности, что сколько-нибудь значительное его количество потребует чрезвычайно больших баков), и инженерные проблемы, произрастающие из его низкой температуры кипения, чрезвычайно велики, так что это горючее было практически отставлено в сторону вплоть до окончания Второй Мировой Войны.

И даже после этого его было не слишком легко получить. В 1947 году имелось три организации с оборудованием для производства жидкого водорода: Университет Чикаго, Университет Калифорнии и Штата Огайо, и их общая производительность составляла 85 литров, или 6 килограмм, в час (в предположении, что все установки работали одновременно, чего могло и не происходить). Но в 1948 году Х.Л. Джонсон из Ohio State Research Foundation прожег водород с кислородом в маленьком двигателе тягой около 45 килограмм. На следующий год Аэроджет установил модуль с производительностью 90 литров в час и поднял уровень производство в США до 12 килограмм в час. Аэроджет провел испытания при уровне тяги 1350 килограмм, используя водород для регенеративного охлаждения (каждый из шести водородных двигателей Сатурна V тягой в 90 тонн – пять на второй ступени и один на третьей – сжигают 36 килограмм водорода в секунду).

Водород является сверхкриогенной жидкостью с точкой кипения 21К, которая ниже таковой у любой субстанции во вселенной за исключением гелия (для кислорода точка кипения равна 90К). Это означает, что проблема теплоизоляции становится в бесконечной степени сложнее по сравнению с кислородом. И имеется ещё одна сложность, специфическая именно для водорода.

Квантовая механика предсказывала, что молекула водорода H_2 должна присутствовать в двух формах: орто- H_2 с двумя ядрами с одинаковым спинами (параллельными) и пара- H_2 с противоположными спинами (антипараллельными). Далее, было предсказано, что при комнатной температуре или выше, три четверти молекул в общей массе водорода должны быть в орто-форме и одна четверть в пара-форме, и при температуре кипения почти весь водород должен находиться в пара-состоянии.

Но в течение многих лет никто не обращал внимание на указанный феномен (эти две формы должны быть неразличимы по своей теплопроводности). Затем, в 1927 году Д.М. Деннисон указал в *Proceedings of the Royal Society*, что переход из орто в пара-состояние может быть медленным процессом, занимающим, возможно, несколько дней, и если исследователи подождут немного перед своими измерениями, то они могут получить интересные результаты.

Урий, Бриквидд и другие в США также как и Класиус и Гиллер в Германии всецело рассмотрели вопрос между 1929 и 1937 годами, результаты были на самом деле интересными и, когда топливное сообщество начало к ним присматриваться, приводящими в замешательство. Переход *был* медленным и занимал несколько дней при 21К. Но это не имело значения для ракетчика, который просто хотел зажечь эту штуку. Что же было важно, так это то, что каждый моль водорода (2 грамма), переходивший из орто-фазы в пара-фазу, выделял в ходе этого процесса 337 калории. И в силу того, что для испарения одного моля водорода достаточно только лишь 219 калорий, получение жидкостью, что всё еще почти на три четверти состояла из орто-водорода, теплоты от последовательного перехода последнего в пара-водород было достаточно для перевода всего объема в газообразное состояние. И все это без всякой помощи притекающей из вне теплоты.

Решение проблемы было очевидным – нужно было найти катализатор, что ускорит процесс перехода, и выделяемая энергия может быть погашена при охлаждении и сжижении и не проявится позже, создавая проблемы; и в течение 50-ых несколько человек искали такую штуку. П.Л. Баррик, работая в Университете Колорадо и Бюро Стандартов в Болдере, Колорадо, придумал первый катализатор нужного типа, что использовался в больших масштабах – гидрированный оксид железа. С тех пор были найдены несколько других катализирующих материалов – палладиево-серебряные сплавы, рутений и много чего ещё, некоторые были эффективнее оксида железа – и проблема орто-пары была подшита к делу и забыта.

К 1961 году жидкий водород стал коммерческим продуктом, поставляемым Linde, Air Products и некоторыми другими организациями, готовыми продать вам любое желаемое количество и доставить его в автоцистернах (их устройство, к слову, представляет собой нечто особенное. Совершенно новый тип изоляции был разработан для возможности изготовить такие цистерны).

Обращение с жидким водородом с тех пор стало рутинной работой, хотя с ним нужно было иметь дело с уважением. Если происходит его утечка, то, конечно, это вызывает сильный пожар и угрозу взрыва, и все меры предосторожности должны быть приняты во избежание попадания в водород кислорода, который при этом замерзает и производит смертельно чувствительную взрывчатку. И имеется еще одно замечательное нечто относительно водородного пламени – оно практически невидимо, и по крайней мере при дневном свете вы легко можете зайти прямо в

огонь, так его и не заметив.

Довольно интересной недавней разработкой является гетерогенный, или «шуговый», водород, представлявший собой жидкий водород, охлажденный до своей точки замерзания 14К и частично замороженный. Данная шугообразная смесь твердого и жидкого водорода может быть прокачана точно также, как и гомогенная жидкость, и её плотность значительно выше, чем у водорода возле точки кипения. Р.Ф. Двайер со своими коллегами из подразделения Linde в Union Carbide отвечают за большую часть данной работы, что все ещё находится в стадии разработки.

Центавр тягой в 13,5 тонн² и 90-тонный J-2 являются самыми большими водород-кислородными двигателями, побывавшими в полёте, но уже на подходе двигатели тягой в 680 тонн (М-1 от Аэроджет)³, и все они имеют электрическое зажигание. Водород и кислород сами по себе не самовосламеняются, но их горение очень легко инициировать. Газообразный кислород и водород поступают в небольшую вспомогательную камеру, где они зажигаются при помощи электрического разряда, после чего пламя из указанной дополнительной камеры запускает процесс в главной камере. Некоторая работа была проведена с самовосламенением кислорода с водородом, Л.А. Дикинсон, А.Б. Амстер и проч. в Stanford Research Institute докладывали в 1963 году, что незначительное количество (меньше чем одна десятая 1 процента) O_3F_2 в жидком кислороде должно давать нужный эффект, и данная смесь была стабильна в течение по крайней мере недели при 90К (точке кипения кислорода). Соединение O_3F_2 , иногда называемое фторидом озона, является темнокрасной, нестабильной и чрезвычайно химически активной жидкостью, производимой с помощью электрического разряда в смеси кислорода и фтора при температуре около 77К. Недавно было доказано, что на самом деле это смесь O_2F_2 и O_4F_2 . Однако не похоже на то, что электрическое зажигание водород-кислородных двигателей будет через какое-то время вытеснено чем-то иным.

Вершиной развития водородных двигателей является атомная ракета. Как мы уже видели (в главе, посвященной эффективности), для получения действительно высокого удельного импульса нужно нагреть водород до 2000К или что-то в районе данной температуры и затем расширить его в сопле. И это можно сделать только в двигателе атомной ракеты. Реактор с обогащенным ураном и графитовым замедлителем становится источником энергии, а водород рабочей жидкостью (в процессе разработки возникла одна специфическая сложность. Водород при 2000К или около того растворяет графит – он превращается в метан – подобно тому, как горячая вода воздействует на кусок сахара. Решением стало покрытие водородных трактов карбидом ниобия).

Двигатели Phoebebus-1, испытанные в 1966 году на Равнинах Болванов (оцените название!) в Неваде с реактором мощностью в 1100 мегаватт (тепловых), нормаль-

²Прим. перев. Очевидно, что автор имеет в виду двигатель RL-10, использующийся на разгонном блоке «Центавр»

³Какая досада, что Циолковский не дожил до того момента, когда он смог бы увидеть М-1, что 9 метров высотой с критическим сечением диаметром в 80 сантиметров и шириной среза сопла в 6 метров. На полной тяге он заглатывает почти 270 килограмм жидкого водорода и полторы тонны жидкого водорода в секунду. Константин Эдуардович был бы впечатлён.

но работали на уровне тяги в 25 тонн с удельным импульсом 750 секунд (значения удельного импульса выше 860 ожидаются в скором времени). Мощность (величина механической энергии, в которую переходит тепловая) была, таким образом, равна примерно 912 мегаватт, что подразумевает работу реактора на уровне немного выше номинального. Температура в камере равнялась примерно 2300К.

Ожидается, что серия ядерных двигателей Phoebus-2, находящихся в стадии разработки, будет работать на уровне тяги около 115 тонн, что выше значения тяги J-2, и мощность реактора (тепловая) будет выше 5000 мегаватт. Это в два раза больше значения мощности, создаваемой дамбой Гувера – и генерирующий ее реактор размером с письменный стол. Впечатляющее, нужно сказать, маленькое устройство.

Работа с жидким фтором стартовала примерно в то же время, что и для жидкого водорода, и ЛРД была пионером в этой области начиная с 1947 года. Фтор не был слишком доступен в то время, так что они производили и сжижали его на своей площадке, и это был подвиг, что вызывает уважение у каждого, кто когда-либо пробовал работать с фтором на протяжении хоть какого-то времени. Первоначально они прожгли фтор с газообразным водородом, но к 1948 году удачно испытали его и с жидким водородом, который использовался для регенеративного охлаждения. А к весне 1950 года тоже самое было проделано с гидразином, и, принимая во внимание состояние тогдашней технологии, их достижения были чем-то невероятным.

Билл Доул из North American также испытал небольшой фторовый двигатель в 1947 году, но по сравнению с вышеуказанными успехами, данная работа не была сразу же доведена до конца. Эффективность оказалась хорошей, но плотность жидкого фтора (полагавшаяся равной 1,108 при точке кипения) была значительно ниже таковой у кислорода, и военные (ЛРД работала на Сухопутные Войска в то время) не желали иметь с ним дело.

Но данная ситуация быстро менялась, часть народа из Аэроджет попросту не верила 54-летнему значению, полученному Дьюаром для плотности жидкого фтора, и Скотт Килнер из данной организации провел измерения самостоятельно (офис Naval Research предоставил нужные деньги). Экспериментальные сложности были очень высоки, но он их преодолевал и в июле 1951 года установил, что плотность жидкого фтора при точке кипения равна не 1,108, а чуть выше 1,54. Имела место своего рода сенсация в топливном сообществе, и несколько других агентств занялись подтверждением данных результатов. Килнер оказался прав, и отношению к фтору было изменено (ONR, бывшее образцом совершенства среди спонсоров и наиболее искушенным – в радиусе нескольких парсек – финансирующим агентством, разрешило Килнеру напечатать свои результаты в открытой литературе в 1952 году, но множество публикаций и ссылок до сих пор приводят старое значение. И большое количество инженеров, к несчастью, имеют склонность к вере всему написанному).

Несколько агентств немедленно исследовали эффективность фтора с гидразином, аммиаком и их смесью с весьма неплохими результатами. Они не только получили хорошую эффективность, но и отметили отсутствие проблем с зажиганием, жидкий фтор самовосламенялся почти со всеми горючими, что они опробовали.

К сожалению, он также самовоспламенялся практически со всем остальным. Фтор не только чрезвычайно токсичен; он также суперокислитель и при подходящих условиях реагирует со всем, кроме азота, легчайшими из благородных газов и соединениями, что были до предела фторированы. И обычно реакция происходит бурно.

Фтор может храниться в емкостях из некоторых металлов – стали, меди, алюминии и т.д. – по причине немедленного им формирования тонкого инертного покрытия из фторида металла, что предотвращает последующую реакцию. Но если этот инертный слой поцарапан или расплавился, может получиться впечатляющее зрелище. К примеру, если газу позволено течь быстро в проходе или через клапан, или он приходит к контакту с пятнами жира или что-то вроде этого, металл с высокой степенью вероятности вспыхивает – и фторо-алюминиевое пламя является впечатляющим зрелищем. Которое лучше видеть на расстоянии.

Но, как это обычно и бывает, с этой штукой можно иметь дело, и если вы обращаетесь с ним аккуратно и желаете сжечь в своей ракете, то компания Allied Chemical Co. будет счастлива доставить вам грузовик, полный жидкого фтора. Указанная машина сама по себе является замечательной конструкцией, где внутренний фторовый бак окружен емкостью с жидким азотом для предотвращения испарения и утечки *любого* количества фтора в атмосферу. Всевозможные предосторожности – передняя тележка, полицейское сопровождение и все что угодно ещё – применялись когда данные грузовики путешествовали по общественным дорогам, но иногда мне было просто интересно, на что это будет похоже, если одна машина с фтором столкнется с другой, перевозящей, скажем, жидкий пропан или бутан.

Создание больших фторовых двигателей было медленным процессом и, порой, весьма впечатляющим. Я видел один фильм испытания, проведенного Bell Aerosystems, при котором заглушка для фтора разрушилась и метал вспыхнул. Это выглядело как если бы двигатель имел два сопла под прямым углом с большим пламенем, бьющим из места утечки так же, как и из сопла. Двигатель был разрушен, и весь тестовый стенд сгорел до того, как операторы смогли всё выключить.

Но большеразмерные двигатели были разработаны и удачно испытаны, хотя никто из них до сих пор не слетал в составе космических миссий. Рокетдайн создала Номад, 5,5-тонный двигатель, работающий на жидком фторе и гидразине и предназначенный для использования в составе верхних ступеней, а Белл построила 16-тонный Чариот для третьей ступени Титана III. Он сжигал фтор и смесь монометилгидразина, воды и гидразина, сбалансированную до CO и HF и имевшую точку замерзания значительно ниже, чем у гидразина. А Дженерал Электрик разработала фторо-водородный двигатель X-430 тягой в 34 тонны.

Начиная с 1953 года Ордин из LFPL и затем народ из Рокетдайн в конце 50-ых и начале 60-ых исследовали возможность улучшения эффективности керосинкислородных двигателей путем добавления фтора в окислитель (фтор и кислород легко смешиваются друг с другом, и их точки кипения отличаются на пару градусов) и обнаружили, что добавление 30 процентов фтора в ЖК увеличивает эффективность более чем на 5 процентов и все ещё не нарушает работу (Рокетдайн прожгли эту смесь в двигателе Атласа) баков, турбин и проч., разработанных для жидкого кислорода. И в качестве бонуса было получено самовосламенение. Смесь

жидкого фтора и кислорода была названа «Flox», при этом обычно добавлялось число, на указывающее процентное содержание фтора. Для максимальной эффективности данная комбинация должна сгорать (с углеводородом) до HF и CO, что означает, что Flox 70 является лучшим окислителем для RP-1 – по крайней мере с точки зрения эффективности. Удельный импульс для RP-1 и жидкого кислорода (вычисленный при давлении 68 атмосфер в камере, одной атмосфере для реактивной струи, случая сдвигающегося равновесия и оптимального соотношения окислитель/горючее) равен 300 секунд, с Flox 30 получено 316 секунд, для Flox 70 (который балансирует CO и HF) это значение определено как 343 секунды, для чистого фтора оно падает до 318 секунд.

Вряд ли фтор когда-нибудь будет использоваться для больших ускорителей – вся эта плавиковая кислота в выхлопе сурова для пусковой площадки и оборудования, не говоря уже о проживающем рядом населении – и он дороже кислорода на порядок, но для работы в глубоком космосе трудно придумать лучшую пару, чем водород и фтор. Так что он идет своей дорогой.

Будущее озона не выглядит столь многообещающим. Или, точнее, озон был многообещающим на протяжении многих лет, но ожидания не сбылись.

Озон, или O₃, является аллотропической формой кислорода. Это бесцветный газ или, если он достаточно охлажден, прекрасного вида темно-голубая жидкость и твердое вещество. Он производится на коммерческой основе (будучи полезными при очистке воды и тому подобному) при помощи процесса Велсбаха, при котором электрическая дуга воздействует на поток кислорода. Что делает озон привлекательным в качестве окислителя, так это то, что 1) его плотность в жидком состоянии значительно выше, чем у жидкого кислорода и 2) при разложении одного моля при сгорании выделяется 34 килокалории энергии, что соответствующим образом улучшает вашу эффективность. Зангер интересовался им в 30-ых, и интерес сохранялся до настоящего времени, закончившись большим разочарованием.

Озон имел свои недостатки, наименьшим из которых была токсичность по крайней мере не меньшая, чем у фтора (те люди, что говорят о бодрящем запахе озона, просто не встречались с по-настоящему высокой его концентрацией). Гораздо более важным является тот факт, что озон нестабилен – причем убийственным образом. По малейшему поводу и иногда вообще без причины он может перейти со взрывом в форму кислорода. И данный переход катализируется водой, хлором, оксидами металлов, щелочами и, вероятно, некоторыми субстанциями, что так и не были идентифицированы. По сравнению с озоном пероксид водорода обладает чувствительностью борца-тяжеловеса.

В силу того, что чистый озон был смертельно опасен, работа сконцентрировалась на растворах озона в кислороде, которые ожидалось менее чувствительными. Привлеченными организациями были Forrestal Laboratories Принстонского Университета, Armour Research Institute и Air Reduction Co. Работа началась в начале 50-ых и с того момента продолжалась, то останавливаясь, то возобновляясь.

Обычно газообразный кислород прогонялся через озонатор Велсбаха, и озон конденсировался в растущем потоке, поступающем в жидкий кислород до тех пор, пока вы не получали желаемую концентрацию, а затем эта смесь использовалась в качестве окислителя при запусках вашего двигателя. В течение 1954-57 годов

Forrestal провели огневые испытания озона с концентрацией вплоть до 25 процентов, применяя этанол в качестве горючего. И они сталкивались с проблемами.

Точка кипения кислорода равна 90 К (работая с криогеникой, гораздо проще думать и говорить в абсолютных градусах Кельвина, чем в градусах Цельсия), для озона же это 161 К. При прекращении подачи окислителя внутри линий остается жидкость, сформированная озоново-кислородной смесью, что немедленно начинает испаряться. Кислород с его более низкой температурой кипения естественным образом улетучится первым, и содержание озона в растворе станет более концентрированным. И когда указанная концентрация достигнет 30 процентов, при любой температуре ниже 93 градусов начнут происходить странные вещи. Смесь разлагается на две жидкие фазы, одну, что содержит 30 процентов озона, и другую с 75 процентами. И, по мере выкипания кислорода, 30-процентная фаза уменьшается, а 75 процентная увеличивается до тех пор, пока вы не получаете снова один только раствор – полностью с 75 процентами озона. И *данная смесь является чрезвычайно чувствительной!*

Так что после серии взрывов, последовавших за выключениями двигателей, что создавали некие сложности для ремонта их трубопроводов и сильно били по нервам инженеров, были приняты некоторые строгие процедуры по очистке. Сразу после выключения линии окислителя промывались жидким или газообразным кислородом или азотом для устранения оставшегося озона перед тем, как он мог натворить бед.

Это являлось некоторого рода решением проблемы, но не слишком удовлетворительным. Двадцать пять процентов озона в кислороде не настолько превосходит кислород, чтобы его привлекательные стороны серьезно перевесили сложности с обращением. Слегка лучший раствор мог бы как-то устранить проблему расслоения фаз жидкости, и в 1954-55 годах Дж. М. Платц из Armour Research Institute (сейчас это ITRI, или Illinois Institute of Technology Research Institute) достиг некоторого успеха на данном направлении. Он показал, что добавление около 2,8 процента Фреона 13, CClF_3 , к смеси предотвращает разделение фаз при 90 К, хотя и не делает этого при 85 К. Что означает, что если у вас была, скажем, 35-процентная смесь при точке кипения кислорода, она останется гомогенной, но если вы охладите её до точки кипения азота 77 К, то выделится смертельно опасная высококонцентрированная фаза. У.К. Бойд, У.Э. Берри и Е.Л. Уайт из Battelle и У.Д. Мэрансик и А.Д. Тэйлор из Air Reduction пришли к лучшему решению в 1964-65 годах, когда они показали, что 5 процентов OF_2 или 9 процентов F_2 , добавленные к смеси, совершенно устраняют проблему разделения фаз и не ухудшают производительность, как это бы делал фреон. При этом никто так и не получил хотя бы внешне правдоподобного объяснения указанного растворяющего эффекта данных добавок!

Ещё одной рассмотренной озоновой смесью были озон и фтор, детально исследованный в течение 1961 года А.Дж. Гейнор из Armour (тридцать процентов озона были бы оптимальны для RP-1). Но улучшения по сравнению с Flox 70 были бы не такими впечатляющими, притом что даже мысль о том, что может произойти, если озон в окислителе попадет на стартовую площадку и распылит фтор по всей округе, слегка нервировала, и я не слышал об испытаниях двигателя на такой смеси.

Что касается продолжающихся взрывов озона. Некоторые исследователи верят, что они инициированы следовыми количествами, скажем, масла в кислороде, появившегося в процессе его производства. Другие работники убеждены, что склонность к взрывам попросту является неотъемлемой частью натуры озона, и все оставшиеся уверены, что тут играет свою роль первородный грех. Так что хотя исследование озона продолжалось в бесцельной манере, только немногие искренне веруют, что озон каким-то образом когда-то вступит в свои права. Я не принадлежу к их числу.

Глава 9

Что делал Ваня

Когда советские люди пришли в Германию, они собрали химиков на фабрике Luena компании I.G. Farben для проведения топливных исследований. В действительности, это не были специалисты в данной области, но, скорее всего, для советского человека химик оставался химиком и всё тут. Агентство ARPA делала что-то похожее в США через приличное количество лет спустя! Вначале немцы не открыли слишком многого за исключением определения свойств уже известных ракетных топлив, но когда их послали в Россию в октябре 1946 года (некоторых в Государственный Институт Прикладной Химии в Ленинграде, остальных в Научно-исследовательский Физико-химический Институт им. Л.Я. Карпова в Москве), то они принялись за работу по синтезу новых соединений, одних, предназначенных для самостоятельного применения, и других в качестве добавок к бензину или керосину. Советские учёные, подобно немецким до них, начали погоню за самовоспламеняемыми соединениями и такого же рода добавками для бензина при реакции с азотной кислотой.

И в силу самой природы химиков и химии как науки выбранные ими пути были теми же самыми, что и наши. Они исследовали виниловые эфиры подобно немцам до этого и после этого в 1948 году за четыре года до проведения таких же работ в NYU синтезировали и проверили все ацетилены, о которых только и могли подумать. В 1948 году были опробованы аллиловые амины; Майк Пино из California Research занимался тем же самым в указанный период времени. В 1949 году были исследованы тетраалкиловые диамины этилена за два года до того, как Phillips Petroleum занялась этой темой. И в 1948 и 1949 годах отработаны меркаптаны и органические сульфиды точно также, как это проделан Пино. Были исследованы все амины, что имелись в наличии или синтезированы, и опробованы такого рода смешанные соединения, как винилоксиэтиламин. И все, что было получено, смешивалось с бензином — обычно пиролитического или высокоароматического типа, в надежде на хорошую самовоспламеняемость. Была даже опробована обыкновенная сера в некоторых смесях. Но на протяжении длительного времени наиболее подходящим топливом для их тактических ракет оставалась разработанная немцами Тонка-250, смешанный ксилидин и триэтиламин. Вторая ступень ракеты SA-2 Guideline (обозначение в США, нам неизвестно оригинальное название)¹ типа поверхность-воздух, использовавшаяся Северным Вьетнамом, работа-

¹Прим. перев. Советская аббревиатура С-75 «Двина».

ла на данном топливе вместе с КДАК.

Самостоятельно произведенный гидрат гидразина (в отличие от захваченного в Германии) стал доступен в Советском Союзе к 1948 году, но, видимо, не проявлялось большого интереса к гидразину и его производным до примерно 1955 или 1956 года, когда советские химики (все немцы были отправлены домой в 1950 году) узнали о нашем успехе с НДМГ. Данный недостаток интереса мог быть вызван несовместимостью меди и гидразина, и советским инженерам нравилось изготавливать свои двигатели с применением меди по причине её прекрасных свойств теплопроводности. И, конечно же, русский климат в определенной степени приводил к разочарованию в использовании гидразина, НДМГ же теперь является одним из их стандартных горючих.

Некоторая работа была проведена с высококонцентрированным пероксидом, первоначально с захваченным немецкий материалом и после 1959 года уже с советским продуктом, но большого интереса в развитии данного направления не было, и в конце концов ВМФ перехватило все работы, связанные с пероксидом (он очень полезен в торпедах).

Азотными кислотами, использовавшимися конце 40-ых и начале 50-ых, были 98-процентная БДАК, БДАК, содержащая 4 процента хлорида железа в качестве катализатора зажигания, и смешанная кислота с 10 процентами серной кислоты, при этом имели место все те же проблемы, что и нас. Были проверены органические сульфоновые кислоты – метансульфокислота, его же -ди- и три-сульфокислоты, этандисульфокислота и просто пироксерная кислота – в качестве ингибиторов коррозии в 1950 и 1951 году (за два года до того, как California Research опробовала их), но использовали их в чуть более чем следовых количествах – около процента, или что-то вроде того, м, естественно, эти ингибиторы попросту не работали как положено.

Но несмотря на проблемы с азотной кислотой, один из немцев обдумал снова уравнение Нёгера со стороны диапазона плотности топлива, и решил высказать пару мыслей своим начальникам². Он решил, что V-2, заправленная азотной кислотой и очень плотным горючим, должна иметь такую дальность, что сделает его по крайней мере Героем Советского Союза, и решил изготовить на самом деле плотное топливо. Так что он смешал 10 процентов толуола, 50 процентов диэтиланилина и 40 процентов *дибромозтана*. Он действительно получил высокую плотность – что-то около 1,4 – но то, что данные бромиды сделали с удельным импульсом, можно было назвать словом «преступление». Его советские началь-

²В первом приближении, дальность ракеты пропорциональна её ускорению в квадрате. И Нёгерат отнес данное ускорение к скорости истечения и плотности топлива при помощи уравнения:

$$c_b = c \ln(1 + d\phi),$$

где c_b есть ускорение движения, c – скорость истечения, d является объёмной плотностью топливных компонент и ϕ массовым совершенством – общим объёмом баков носителя, скажем, в литрах, разделенным на *сухую* массу (при сжигании всего топлива) ракеты в килограммах. Так что дальность очень сильно зависит от скорости истечения, как и от плотности в логарифмической функции, где вносит свой вклад также и массовое совершенство. Если ϕ очень мал, как в случае самолета с установленным ракетным ускорителем, плотность играет почти такую же роль, как и скорость истечения. Если данный показатель велик в случае, например, МБР, плотность топливных компонент гораздо менее важна.

ники, которые не были дураками, бросили один испуганный взгляд на то, чем он занимался, и немедленно отобрали все его химикаты. И четыре недели спустя он предстал перед народным судом, обвиненный, осужденный и оштрафованный на 4000 рублей за, по словам суда, «Введение в заблуждение Советской Науки». И ему ещё повезло, если бы я был членом этого суда, он бы отправился в Сибирь лет на девяносто, и обвинением была бы Исключительная Тупость. Так что русские были счастливы, когда он вернулся домой, ибо кому нужны враги с такими союзниками?

Были сделаны другие попытки получения топлива с высокой плотностью; 8 процентов коллоидного алюминия, взвешенного с стеаратом алюминия в керосине была одной из них. Но эта взвесь замерзала при -6° , и исследователи потеряли к ней интерес. Также они опробовали различную нитроорганику вроде нитропропилена – одного названия достаточно для того, чтобы напугать меня до смерти – в качестве монотоплива без отмеченного успеха, и, подобно немцам до этого, попытались использовать тетранитрометан в качестве окислителя. В результате, во время опыта была разрушена лаборатория.

Недавно они показали значительный интерес к смесям нитрата гидразина и метилгидразина (похожим на мой Hydrazoid N), но предполагали ли они их использование в качестве горючего или монотоплива, остается для нас неизвестным. Их первая баллистическая ракета SS-1A (обозначение НАТО)³ была точной копией А-4 и сжигала 70-процентный спирт с жидким кислородом, данный окислитель был широко доступен ввиду использования в СССР чрезвычайно эффективной и очень быстрой сжижающей воздух установки, разработанной Петром Капицей. Увеличенная ракета SS-2 «Sibling»⁴, созданная в 1954 году, и SS-3 «Shyster»⁵, разработанная в 1956 году, использовали такую же топливную пару за исключением более высокой концентрации спирта, повышенной с 70 до 92,5 процентов.

Но как вы можете помнить, спецификации США для азотной кислоты, включая ингибитор HF, были опубликованы в 1954 году. Так что следующими советскими баллистическими ракетами стали перепроектированные SS-1A, SS-1B «Скад»⁶, работавшие на керосине и ИКДАК. Вероятно, что ими применяется химическое зажигание – возможно, что при помощи триэтиламина – и используемый керосин является высоконафтовым и очень близким к RP-1. Они предпочитают его другим типам по причине того, что он гораздо менее склонен к коксованию, чем, скажем, высокоолефиновые смеси, при регенеративном охлаждении, и подходящие источники нефти в избытке присутствуют в Советской Союзе. Имеют место два «ракетных» типа ИКДАК, широко используемой в СССР – АК-20 с 20 процентами N_2O_4 и АК-27, содержащая 27 процентов.

С пришествием «Скада» стало очевидным наличие в Советской Союзе двух конструкторских бюро, и советское высшее командование предположительно сохраняет мир в семье путем распределения разрабатываемых проектов между ними. Данный подход не является совершенно неизвестным в нашей стране, где кон-

³Прим. перев. Советское название Р-1 (индекс ГРАУ — 8А11, объект «Волга»)

⁴Прим. перев. Советское название Р-2 (индекс ГРАУ — 8Ж38)

⁵Прим. перев. Советское название Р-5 (индекс ГРАУ — 8А62)

⁶Прим. перев. Советское название Р-11/Р-11М (Индекс ГРАУ — 8А61/8К11)

тракт, выданный Локхид может предшествовать заказу для Джeneral Дайнемикс.

Одна группа остается привержена жидкому кислороду и разработала SS-6, SS-8 и SS-10⁷. Монструозное 20-сопловое чудище SS-6, что запустило Юрия Гагарина и Восток 1 на орбиту, сжигало кислород и эквивалент RP-1. SS-8 «Sasin» и SS-10 работали на кислороде и, вероятно, смеси гидразин-НДМГ, эквивалентной нашему Аэрозину 50-50⁸.

Другая группа оставалась привержена долгохранимым окислителям в виде ИКДАК или N₂O₄, используя последний для больших стратегических ракет, находящихся в подогреваемых паром пусковых шахтах, в то время как первая обычно применялась в тактических ракетах ближнего радиуса действия, что должны были иметь дело с русской зимой. Ракета SS-4 «Sandal»⁹ использовала ИКДАК и, вероятно, смесь реактивного горючего и НДМГ¹⁰ (сравните с ракетой США Найк-Аякс), в что время как БРСД SS-5 «Skean»¹¹ и МБР SS-7¹² сжигали кислоту и НДМГ. Недавно развернутая МБР SS-9 «Scarp»¹³, что является близким родственником ракеты Титан II в США, но немного её крупнее, использует N₂O₄ с, возможно, смесью 50-50. Имело место некое предположение, что она может работать на ММГ, но, скорее всего, это маловероятно. Пятьдесят на пятьдесят гораздо дешевле, даёт точно такую же или чуть лучшую эффективность, и в случае стратегической ракеты у вас не повода беспокоиться о температуре замерзания топлива¹⁴. Меньшего размера SS-11¹⁵ работала на таких же топливных компонентах, и тактическая ракета SS-12¹⁶, более или менее эквивалентная американскому «Лэнсу», сжигала ИКДАК и реактивное горючее¹⁷. Для полноты картины на текущий момент отметим, что SS-13¹⁸ является трёхступенчатым твёрдотопливным эквивалентом «Минитмена», и SS-14¹⁹, в сущности, двумя верхними ступенями РТ-2. Советские морские ракеты, сравнимые с «Поларисом», используют ИКДАК или N₂O₄ с НДМГ или 50-50, или являются твёрдотопливными. И китайские баллистические ракеты, находящиеся в стадии разработки, базируются на SS-3, модифицированной для сжигания ИКДАК и керосина.

⁷Прим. перев. Советские названия Р-7 («семёрка», индекс ГРАУ — 8К71), Р-9А (индекс ГРАУ — 8К75) и, возможно, УР-200 (индекс ГРАУ — 8К81). Последняя была разработана в ОКБ-52 Челомея и не была поставлена на вооружение.

⁸Прим. перев. Р-9 использовала керосин и переохлажденный кислород, УР-200 работала на стандартной топливной паре амил-гептил. Возможно, что под SS-10 понимается Космос-2 (11К63) с НДМГ и кислородом на второй ступени.

⁹Прим. перев. Советское название Р-12 (индекс ГРАУ — 8К63)

¹⁰Прим. перев. На самом деле в Р-12 применялось горючее ТМ-185 (смесь углеводородов, близкая к скипидару)

¹¹Прим. перев. Советское название Р-14 (индекс ГРАУ — 8К65)

¹²Прим. перев. Советское название Р-16 (индекс УРВ РВСН — 8К64)

¹³Прим. перев. Советское название Р-36 (индекс УРВ РВСН — 8К67)

¹⁴Прим. перев. На самом деле Р-36 использовала стандартную советскую топливную пару амил-гептил (N₂O₄-НДМГ)

¹⁵Прим. перев. Советское название УР-100 (индекс ГРАУ — 8К84)

¹⁶Прим. перев. Советское название Темп-С (Индекс ГРАУ — 9К76, по договору РСМД — ОТР-22)

¹⁷Прим. перев. Данная ракета является твёрдотопливной.

¹⁸Прим. перев. Советское название РТ-2 (индекс комплекса/ракеты — 15П098/8К98, обозначение по договору СНВ РС-12)

¹⁹Прим. перев. Советское название РТ-15 (индекс ракеты — 8К96)

Что касается более продвинутых, или «экзотических», топливных компонент, то советский подход выглядит по всей видимости более консервативным по сравнению с Соединенными Штатами. В СССР проводились некоторые работы с боранами в 1949-1950 годах, но участники оказались достаточно благоразумными и окончили их до того момента, как было потрачено много времени и денег. Имели место несколько испытаний с 10 процентами озона в кислороде, проведенные в Восточной Германии в 1952 году, но нет никаких указаний на продолжение данной деятельности, так же, как и нет признаков интенсивной работы с галогеновыми окислителями. В недавней большой обзорной статье, посвященной перхлорилфториду, опубликованной в советском химическом журнале, все ссылки вели на западные источники.²⁰ Имели место некоторые замечания относительно OF_2 и предположительных преимуществ суспензий металлов, но ничто не указывает на то, что за данными словами что-то стоит. Так же, как и нет указаний на что-то существенное, сделанное в отношении жидкого фтора или водорода, хотя было бы удивительно, мягко выражаясь, если бы не рассматривалось использование последнего в их собственных космических программах.

Коротко говоря, советская подход имеет тенденцию к ограничению выбора топливных компонент. Кислород, N_2O_4 , ИКДАК, реактивное горючее, НДМГ и их смеси – вот практически и всё. Когда им нужно больше тяги, они не ищут причудливое топливо с более высоким удельным импульсом, а просто строят большего размера ракету. Возможно, так и нужно делать.

²⁰Разумеется, это *может* означать, что они только начали работать в данной направлении. Такого рода обзорные статьи в СССР часто сигнализируют о старте исследовательской программы.

Глава 10

«Экзотика»

Пятнадцать лет назад люди обычно спрашивали меня – «В конце концов, что же это *такое* – экзотическое топливо?» – и получали ответ – «Это дорогое топливо, оно содержит бор и, возможно, что не работает». Я собирался первоначально назвать данную главу «Ляп с бором на миллиард баксов», но отказался от этой мысли по двум причинам. Во-первых, такое название, вероятно, будет рассматриваться в качестве бестактного некоторыми из людей, что одобрили связанные программы. Второй причиной является то, что такое утверждение нельзя рассматривать как совершенно точное. В действительности, боровые программы *не* стоили миллиарды долларов, это просто так казалось на тот момент времени.

Бораны являются соединениями бора и водорода, самыми известными из них (хотя имеется и множество других) это диборан B_2H_6 , пентаборан B_5H_9 и декаборан $B_{10}H_{14}$. При комнатной температуре первый есть газ, второй – жидкость, и третий находится в твёрдом состоянии. Альфред Сток открыл большинство из наиболее известных боранов между 1912 и 1933 годами, в то время как Х.И. Шлезингер, начиная с 1930, внёс большой вклад в области химии боранов и, в особенности, разработки методов синтеза.

Бораны были противными тварями. Диборан и пентаборан спонтанно вспыхивают в атмосфере, и их горение чрезвычайно сложно погасить. Они реагируют с водой, в конце концов формируя водород и борную кислоту, и данная реакция время от времени проходит бурно. Также они не только распространяют в особенности отталкивающий запах, но и являются чрезвычайно токсичными для всех форм поступления в организм. Данный набор свойств явно не упрощает задачу обращения с ними, кроме того, они очень дороги по той причине, что их синтез ни лёгок, ни прост.

Но бораны обладают одним свойством, что привлекает к ним ракетчиков подобно хиппи к хэппенингу. Они выделяют чрезвычайно много тепла при горении – при сравнении грамм на грамм на 50 процентов больше, чем реактивное горючее. И начиная с 1937 года, когда Парсонс из ЛРД первым рассмотрел декаборан, люди, занимавшиеся топливами, взирали на бораны с затаённой мечтой и вожделели эффективность, что при удачном стечении обстоятельств могла быть выжата из их теплоты горения.

К этой теме нельзя было, конечно же, подступиться пока не завершилась Вторая Мировая Война. Но в 1946 году U.S. Army Ordnance Corps выдала контракт GE

(проект Гермес) для глубокого исследования боранов и разработки методов крупномасштабного синтеза. Основной целью было не создание ракетного горючего, а эксплуатация боранов в качестве топлива для питаемых воздухом двигателей, в основном, реактивных, но ракетчики, что было неизбежно с их увлеченностью, привлекались в любом случае.

Пол Винтернитц из Reaction Motors являлся, возможно, первым, кто выполнил в 1947 году вычисления эффективности боранов и проделал это для диборана, пентаборана и борогидрида алюминия $\text{Al}(\text{BH})_4$ с жидким кислородом. Принимая во внимание скудость и общую ненадежность термодинамических данных не только для указанных возможных горючих, но также и продуктов их сгорания, не говоря уже о сложностях вычислений (не следует забывать об отсутствии в тот момент компьютеров!), мое восхищение его усердием равно разве что изумлению его храбростью.

В любом случае, полученные при вычислениях значения, верны ли они были или нет, выглядели обнадеживающими. Следующим шагом было подтверждение их при испытании двигателя, и диборан (наиболее доступный из боранов) выбрали в качестве горючего и жидкий кислород – окислителя.

Диборан был самым доступным бораном, но даже его не имелось в избытке. В действительности, наличествовало ровно 18 килограмм продукта на момент начала работ RMI, так что испытания должны были проводиться при очень низком уровне тяги (возможно, что в районе 22 килограмм) и были чрезвычайно короткими. При этом, как выполнявший эту операцию инженер признавался мне много лет спустя, «каждый раз при нажатии кнопки я мог чувствовать, как цена Кадилака вылетает в трубу!»

Результаты, если говорить правду прямо в глаза, не вызывали эйфории. Эффективность была угнетающе низкой – гораздо ниже теоретической – и твердые стеклообразные отложения появлялись в критическом сечении (изменяя его размер и форму) и расширяющейся части сопла. Эти отложения состояли, вероятно, в основном из B_2O_3 , но оказалось, что в них содержался также и элементарный бор. Это было явственным показателем плохого сгорания, что совсем не воодушевляло.

Ордиан и Роув в NASA-Lewis прожгли ту же самую пару в 1948 году и получили аналогичные результаты. И не лучше была ситуация при использовании ими пероксида водорода в качестве окислителя. Стекловидные отложения казались столь же характерными для горения боранов, как и ярко-зелёное пламя выхлопа.

Следующим испытанным RMI топливом стал диметиламиновый аддукт диборана – не в точности боран, но близкородственное соединение. Но когда они прожгли его с кислородом в 1951 году, получилось то же самое разочарование, что и с боранами. Что также произошло с пентабораном, который Джек Гууд испытал на следующий год в двигателе тягой 22 килограмма, используя кислород и пероксид водорода в качестве окислителей. Пройдёт еще почти двенадцать лет до того момента, когда хоть кому-то удастся получить хорошие результаты с последней топливной парой. Пара с лучшей эффективностью горения была испытана Ордином в 1955 году – это были диборан и фтор, где, по крайней мере, не возникало отложений в камере – BF_3 является газом – но данная комбинация была чертовски горячей и очень трудной в обращении.

Ранние прожиги боранов не получились, в целом, слишком успешными, но энтузиазм, надежды и ожидания были чрезвычайно высоки, и две конференции, посвященные борановому топливу и возможным горючим, прошли в одном только лишь 1951 году. Некоторая ужасно сомнительная химия была показана на данных встречах – большой прорыв в химии боранов ещё не произошёл – но все хорошо провели время и поехали домой, вдохновлённые на новые подвиги.

И очень скоро они заполучили деньги на их претворение. Проект «Zip» был начат в 1952 году Бюро Аэронавтики ВМФ, разработанный таким образом, чтобы продолжить с того места, где завершился проект Гермес, и создать высокоэнергетическое топливо на базе бора для реактивных двигателей. Это происходило до создания МБР, бомбардировщики дальнего действия, являвшиеся носителями ядерных бомб, были выбраны в качестве оружия запугивания в холодной войне, и всё, что могло увеличить радиус их действия или скорость, являлось чрезвычайно желанным. Основными исполнителями многомиллионных контрактов были Olin Mathieson Chemical Corporation и Callery Chemical Co., но к концу десятилетия многие другие организации – занимавшиеся реактивным движением, химией или академические, называйте их как угодно – привлекались или в качестве небольших главных исполнителей, или как субподрядчики для основных компаний. К 1956 году программа стала настолько громоздкой, что она должна была быть поделена между BBC, отслеживавшей работу Olin Mathieson в рамках программы «HEF» и Бюро Аэронавтики ВМФ, что наблюдала за проектом «Zip» у Callery. Профессиональные журналы поддерживали интерес к проекту Zip и «супер-топливам» (опуская, естественно, засекреченные детали в области химии – которые, в случае публикации, могли дать некоторым людям передышку), и легионы доверчивых и алчных душ вышли на сцену и купили акции бора. И, в итоге, потеряли последнюю рубашу.

Быстро стало ясно, что для получения желаемых физических свойств (похожих на таковые у реактивного горючего) данные топлива должны быть алкиловыми производными боранов. В конце концов три таких соединения были разработаны и развернуты в довольно крупнотоннажное производство. HEF-2 у Mathieson был пропилпентабораном, HiCal-3 у Callery и HEF-3 у Mathieson были смесью моно-, ди- и триэтилдекаборана, и HiCal-4 с HEF-4 являлись смесью моно-, ди-, три- и тетраметилдекаборана. Оба -3 и -4 соединения содержали следовые количества незамещенного декаборана (пропущенные номера представляют топлива на промежуточной стадии синтеза).

Химия борогидридов была исследована как ничто до этого, детали производства отработаны на уровне экспериментального завода, две полномасштабные промышленные установки, одна у Callery и другая у Mathieson, были построены и запущены в поточное производство, руководства по эксплуатации и безопасности были написаны и опубликованы – и все это было осуществлено на хрупкой основе. Никогда ещё один единственный бедный элемент не привлекал такое концентрированное внимание множества химиков и химических инженеров.

И затем вся программа с грохотом остановилась, на что было две причины, одна стратегическая и другая техническая. Первой стали выход на сцену МБР и уменьшающаяся роль бомбардировщиков дальнего действия. Вторая основывалась на том факте, что продуктом сгорания бора является триоксид бора B_2O_3 ,

причем при температуре ниже примерно 1800° это или твердая субстанция, или очень вязкая стеклообразная жидкость. И если у вас есть турбина, вращающаяся со скоростью 4000 оборотов в минуту, и зазор между лопатками равен несколькими тысячным долям сантиметра, а эта липкая, вязкая жидкость выпадает на лопатки, то двигатель, вероятно, придет к тому, что британцы, причем совершенно точно, называют «катастрофической саморазборкой».

Были предприняты всевозможные усилия для снижения вязкости оксида, ни к чему не приведшие, и NEF и HiCal попросту не могли быть использованы в реактивном двигателе. Заводы были остановлены и, в конце концов, проданы на слом. Программа Zip была мертва, но осталась память.

Это, несомненно, было полнейшее фиаско. Малая доля общих расходов, что была потрачена на исследование, добавила за десять лет больше в копилку знаний о химии бора, чем было изучено за 50 лет до этого¹. Одним из самых интересных открытий были «Карбобораны», обнаруженные Мюрреем Коэном из Reaction Motors в 1957 году. Базовое соединение $B_{10}C_2H_{12}$ обладает структурой замкнутой, симметричной и икосаэдрической ячейки, и оно наряду со своими производными показывало удивительно высокую стабильность в отношении окисления, гидролиза и термического разложения. Нефф из Hughes Tool воспользовался данными преимуществами стабильности когда он попытался изготовить монотопливо, основанное на производном от гидроборана (смотри главу, посвященную монотопливам). Производные могли быть также полезны в высокоэнергетических твердых топливах и, даже, возможно, в качестве устойчивого к высоким температурам пластика.

Когда же речь шла о ракетном движении самом по себе, результатом программы Zip стали большие запасы диборана (стартовой точки для синтеза всех боранов и их производных), пентаборана, декаборана и наличие NEF и HiCal, так что их полезность в качестве горючего могла быть изучена на уровне тяги несколько выше разочаровывающего 22-килограммового. Аэроджет, начиная с 1959 года, работала с NEF-3 и пентабораном, прожигая их с N_2O_4 или пероксидом водорода, и Reaction Motors вычистила большинство проблем топливной пары пентаборан-пероксид к 1964 году. С подходящей конструкцией форсунки данная система могла быть приведена к рабочему состоянию с эффективностью, близкой к теоретическому удельному импульсу, и проблема твердых отложений в сопле не была столь существенной при работе двигателя достойного уважения размера. Эта сложность, конечно же, вовсе не возникала при использовании фторного окислителя. Дон Рогиллио из Edwards Air Force Base в 1962-64 годах прожег пентаборан с NF_3 и N_2F_4 и получил довольно хорошую производительность, хотя, ввиду того, что данная комбинация была дьявольски горяча, он имел дело с большим количеством проблем с прогоревшими форсунками и соплами.

Но когда пентаборан был доведен до рабочего состояния, никто не смог найти особого для него применения. Эффективность была действительно хороша,

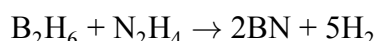
¹ Дик Холцман находился в ARPA в тот период времени, и благодаря ему доступна вся эта химия, не будучи похороненной в документах подрядчиков и сервисных служб. Он собрал всю информацию, уговорил Рональда Хьюза, Ивана Смита и Эда Лаулесса из Midwest Research Institute разместить всё в одном томе, и окончательно отредактировал *Production of the Boranes and Related Research*, что был напечатан в Academic Press в 1967 году.

но плотность пентаборана низка – 0,618 – что препятствует его использованию в тактических ракетах. Далее, окислители (кислородного типа), с которыми он показывал наилучшую эффективность, пероксид и N_2O_4 обладали неприемлемыми точками замерзания, в случае использования азотной кислоты вы теряли существенную долю преимущества в эффективности. И, конечно же, с любым из этих окислителей продукты сгорания содержали большие количества B_2O_3 , и бросающийся в глаза истекающий поток мог быть нежелательным. А когда вы применяли галогеновый окислитель вроде ClF_3 , эффективность не была настолько выше по сравнению с гидразином, чтобы служить оправданием возникающих проблем. И, в конце концов, он все ещё был дорог.

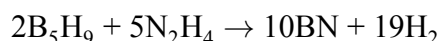
Иная ситуация сложилась с дибораном. Он не мог быть, конечно, использован в ракете (по причине точки кипения, равной $-92,5^\circ$), но вполне подходил для некоторых применений в дальнем космосе, где его низкая плотность (0,433 при температуре кипения) не имеет значения. Естественный партнером диборана является OF_2 (хотя ONF_3 также может подойти), и с 1959 года на настоящее время данная пара исследовалась несколькими агентствами, в том числе Reaction Motors и NASA-Lewis. Эта комбинация выдает высокую температуру, и не слишком легко разработать форсунки и сопла, что смогли бы при таких условиях работать, но данные сложности далеки от непреодолимых, и работающие системы не выглядели находящимися далеко за горизонтом. Данная комбинация, кстати, является необычайно страшной в обращении, обе компоненты чрезвычайно ядовиты, но ракетчики обычно знают, как остаться в живых, и никто пока ещё не был убит.

Одной вещью, что могла бы сохранить пентаборан на сцене, стало пришествие в начале 1958 года систем BN. Компания Callery Chemical являлась родоначальником этой идеи, но в течение года *каждый* подрядчик в области реактивного движения плюс ЛРД, НАСА и EAFB подключились к работе.

Идея состояла в следующем: нитрид бора BN является белым твердым кристаллическим порошком с шестиугольной структурой, похожей на графит². Это очень стабильная молекула с экзотермической теплотой образования около шестидесяти килокалорий на моль. Теперь, представьте реакцию борана с гидразином



или



Теплота образования BN могла бы быть источником энергии, и водород мог бы служить в качестве рабочей жидкости – унося, конечно, твердый BN с собой. Вычисления эффективности показывали, что пара пентаборан-гидразин должна иметь замечательный удельный импульс в 326 секунд, и выявили даже ещё более удивительный факт, состоявший в том, что температура в камере сгорания должна была бы быть около 1500-2000K, что меньше по сравнению со всем, имеющим

²Углерод, конечно, имеет форму как графита, так и алмаза. И некоторые недавние работы указывают, что BN может обладать не только структурой графита, но и алмазоподобной кристаллической решеткой такой же твёрдой, или даже прочнее, как у алмаза самого по себе.

подобного рода эффективность. Данная мысль о *долгохранимой* паре с эффективностью выше 300 секунд и со столь подходящей температурой в камере сгорания запустила каждого, кто занимался реактивным движением, прямиком на орбиту.

Получение достаточного количества пентаборана для работы не было, конечно же, проблемой в 1958-59 годах. BBC имели тонны и тонны этой штуки после их проекта с Mathieson и не имели даже смутной идеи, что со всем этим делать. Так что пентаборан был практически полностью доступен по запросу, и все выскочили на сцену, издавая чрезвычайно счастливые крики. Callery, NASA-Lewis, Reaction Motors и EAFB были одни из первых, кто опробовал данную комбинацию – большинство из них первоначально на уровне тяги в, примерно, 45 килограмм.

Опыт, полученный Reaction Motors, был типичен. Гидразин/пентаборан самовоспламенялись, хотя зажигание было слегка жестким. Эффективность горения оказалась жуткой, примерно 85-88 процентов для эффективности C^* ³. Для удельного импульса ситуация была даже хуже; инженеры были счастливы, когда получили 75 процентов от 326 секунд, которые они должны были иметь согласно вычислениям.

Очевидно, что эффективность сгорания была первой задачей, для которой стало необходимо найти решение, и до тех пор, пока она не была улучшена до разумных значений, ничего не могло быть сделано с удельным импульсом – или чем-либо ещё.

Часть проблемы проистекала из того факта – быстро обнаруженного – что реакция не приводит непосредственно к BN и водороду, как это должно быть в соответствии с уравнениями. Вместо этого некоторая часть бора выбрасывается в элементарной форме, и оставшийся азот соединяется с некоторым количеством водорода, формируя аммиак. Что, естественно, не улучшает эффективность.

Ещё одна проблема лежала в области такого смешивания пентаборана и гидразина, что они смогли бы прореагировать. Гидразин растворим в воде и пентаборан в масле, и они оба замечательно неподатливы в соединении друг с другом (это ведет к работе с монотопливами, см. соответствующую главу). Добавки к данным топливным компонентами не помогали – а было опробовано всё, начиная от гидрата гидразина и заканчивая НДМГ. Для получения хорошего смешивания вы просто должны использовать замечательным образом устроенную форсунку, что Лав, Джексон и Хаберман выяснили трудным путём в EAFB в течение 1959-61 годов. По мере того, как уровень их тяги рос с 45 до 2265 килограмм, они кропотливо поднимали свой показатель эффективности C^* с 76 процентов до 95 и экспериментировали с не менее чем тридцатью различными форсунками, каждая из которых была более продвинутой и сложной, чем предыдущая.

По мере того, как данные работы продолжались, проблемы обращения с пентабораном все ещё имели место – и в особо опасной форме. Как уже мною от-

³ C^* , произносимое как «си стар» является мерой эффективности сгорания, полученной путём умножения замеренного давления в камере сгорания на размер критического сечения сопла и разделённой на массовый расход топливных компонент. Это значение выражается в футах в секунду или метрах в секунду в зависимости от используемой вами системы. Его теоретическая величина может быть вычислена точно также, как и теоретический удельный импульс, и процентное отношение теоретического C^* к замеренному вами экспериментальному значению является хорошей мерой полноты сгорания и эффективности форсунок.

мечалось, пентаборан был чрезвычайно ядовит, также он самовоспламенялся на воздухе, и огонь было сложно погасить. Если вы распыляете воду над горящим объемом этой штуки, огонь в конце концов потухнет – если вы удачливы. Но после этого оставшийся несгоревший пентаборан будет покрыт слоем твёрдого оксида бора или, возможно, борной кислоты, что защищает его от воздействия воздуха. И если это корка треснет (что определённо произойдет), огонь вспыхнет снова. Даже уничтожение оставшегося пентаборана является проблемой, но не той, в которую я буду углубляться. Книга Холцмана расскажет всё это, если вам будет интересно.

Принимая всё вышесказанное, я спросил некоторых людей из Рокетдайна – это компания выполняла работы с BN бок о бок с EANB – как им удавалось иметь дело с данной штукой. «О, нет проблем», они отвечали, «Вы просто следуете правилам из нашего руководства по безопасности!». Я попросил их послать мне копию указанного руководства, и оно прибыло в положенное время. Нельзя сказать, что оно было размером с телефонный справочник Манхэттена, но я видел довольно много муниципалитетов с меньшими телефонными книгами. И даже применяя данное руководство, один из их механиков немного спустя умудрился попасть в госпиталь по причине воздействия пентаборана.

Последним шагом в работе с BN стало расширение масштабов до большого двигателя с тягой примерно в 13,5 тонн, и это было сделано в Edwards в течение 1961-63 годов (между прочим, множество работ с опасным топливом было проведено в Edwards. Это место расположено в середине пустыни Мохаве, и вам нет нужды беспокоиться об окружающей местности. Если даже вы прольёте тонну жидкого фтора – и это там проделали просто для того, чтобы посмотреть на то, что при этом произойдет – единственной штукой, что, вероятно, пострадает, станет мир в душе нескольких американских зайцев и гремучих змей). Я видел фильмы о серии тестовых испытаний, и они выглядели впечатляюще с плотными белыми облаками твёрдого BN, что поднимались в небо на высоту больше трех километров.

Результаты, первоначально полученные для крупных двигателей, были плохими – порядка трех четвертых от теоретического удельного импульса – но эти показатели улучшили конструкцией форсунок, и до конца 1963 года магические 300 секунд были достигнуты (окончательная конструкция форсунки включала около *шести тысяч* аккуратно просверленных отверстий! Это было недёшево в производстве). Но BN систему в конце концов отработали и она стала успешной.

Одной лишь только ложкой дегтя в бочке меда являлось то, что она устарела ещё при рождении. ClF₅ вышел на сцену в тот момент, когда BN достиг успеха – и пара ClF₅-гидразин столь же эффективна, как и гидразин-пентаборан, но при гораздо более высокой плотности и лёгкости в обращении, работая в более простых и дешевых двигателях и имея невидимый истекающий поток газов – и при этом будучи дешевле на порядок. Пять лет работ стали разочаровывающими упражнениями с дорогостоящей безделушкой. Иногда ракетчики спрашивают сами себя, зачем они вообще занялись своим делом.

Однако имеется некоторая слабая надежда для системы BN в довольно специализированном применении. Аэроджет сравнительно недавно (в 1966-67 годах) исследовала возможности использования данной комбинации в прямоточной ра-

кете, где выбрасываемый водород, BN, элементарный бор и аммиак могли бы дожигаться в набегавшем потоке воздуха для получения дополнительной тяги, и обнаружила, что данный подход работает очень хорошо для такого применения. Так что возможно, что люди из Edwards не переливали из пустого в порожнее.

Боргидриды были подобного же рода топливом, что так и не заработало. Похоже, что это можно объяснить следующим образом. Боргидриды бывают двух или, возможно, трёх типов. Первый тип состоит из боргидридов щелочных металлов LiBH_4 , NaBH_4 и т.д., являющихся простыми ионными солями – белыми кристаллическими твердыми веществами, и не имеющими никаких особенностей. Они достаточно стабильны – NaBH_4 почти стабилен в воде – и с ними можно легко иметь дело.

Как уже отмечалось, боргидрид лития был опробован Доном Армстронгом из Аэроджет не позднее 1948 года в качестве средства снижения температуры замерзания у гидразина. Он обнаружил, что данная смесь была нестабильной, но, тем не менее, Стэн Танненбаум из RMI проверил её снова в 1958 году с такими же результатами. И затем снова в Аэроджет Розенберг обратил свой взор на точно такую же смесь в 1965 году, и он обнаружил, что 3 процента боргидрида разложились в течение 200 дней при 69° . Что всё вместе создавало впечатление, что «это то место, где я пришел в финишу».

Боргидрид натрия был гораздо стабильнее литиевой соли, и его раствор в жидкой аммиаке тоже являлся довольно устойчивым. Аэроджет прожгла его с кислородом в 1949 году, но полученная ими эффективность была хуже, чем у гидразина, что привело к остановке работы. А Патрик Макнамара из EAFB испытал раствор соли натрия в гидразине с трифторидом хлора в 1965 году, но получил худшую по сравнению с чистым гидразином эффективность.

Второй тип («предположительно») включает аммиак и боргидрид гидразина, что может быть приготовлен *на месте* в жидком аммиаке или гидразине, но который был бы нестабильным, будучи изолированным при комнатной температуре. Аэроджет прожгла раствор боргидрида гидразина в гидразине (с кислородом) в 1949 году. Я подозреваю, что смесь являлась нестабильной, потому как ничего далее после этого не последовало.

Боргидриды алюминия и бериллия $\text{Al}(\text{BH}_4)_3$ и $\text{Be}(\text{BH}_4)_2$, представляющие собой третий тип, являются ковалентными с необычными связями, жидкими при комнатной температуре и самовосламеняющимися со взрывом при контакте с воздухом. Никто не имел достаточно боргидрида бериллия собранным в одном месте и времени для испытания в двигателе, но Армстронг и Янг в Аэроджет прожгли боргидрид алюминия с кислородом в 1950 году, и на следующий год Уилсон, также из Аэроджет, испытал его с жидким фтором. Результаты не были достаточно впечатляющими для того, чтобы компенсировать сложности, возникающие в обращении с данным горючим, и боргидрид алюминия был более или менее отложен в сторону примерно на десять лет.

Затем, начиная с 1960 года, доктор Х.У. Шульц и Дж.Н. Хогсетт в Union Carbide начали разработку «Hybaline»-ов. И – что является редким в топливных делах – они делали это на деньги компании, а не государства. Боргидрид алюминия формирует эквимольное комплексное соединение – называемый аддуктом – с аминами. И данные аддукты *не* вспыхивают самопроизвольно в атмосфере, так что при

разумных мерах предосторожности с ними можно было обращаться без особых сложностей.

Шульц и Хогсетт экспериментировали с дюжиной различных аминов, но топливо, на котором они остановились как имеющем наилучшее сочетание свойств, было смесью аддуктов монометиламина и диметиламина, названное Hybaline A₅ (эти учёные также изготовили несколько аддуктов боргидрида бериллия и нарекли их «Hybaline B»). Они занимались Hybaline-ми в течение около четырех лет, приводя вычисленные значения эффективности, что радовало взгляд. Одной лишь предположенной ими сложностью – на основе некоторых очень сомнительных экспериментальных значений – была теплота формирования их смеси аддуктов, несовместимая с общепринятой величиной для боргидрида алюминия, что создавало некоторый скептицизм со стороны наблюдателей за их работой. Окончательно вопрос был разрешён когда EAFB провел серию полномасштабных (тягой в 2265 килограмм) испытаний с Hybaline A₅/N₂O₄ и получил максимальное значение 281 секунд, что было гораздо меньше, чем для, скажем, ClF₅ и гидразина. Так что к 1964 году с Hybalin-ми было закончено.

Самая последняя экскурсия в царство экзотики была предпринята Ф.С. Гандерлойем из Рокетдайн. Он обнаружил, что некоторые линейные полимеры гидрида бериллия и диметилбериллия с цепочками, обрывающимися на группах BN₃ (так как данное исследование было засекречено, я не могу описать больше деталей), были вязкими жидкостями, и работал с ними в течение четырех или пяти лет. Вовлеченная химия интересна сама по себе, но не похоже, что это приводит к реально используемому топливу. Данные жидкости являются чрезвычайно ядовитыми, и оксид бериллия, входящий в состав продуктов истечения в случае использования одного из вышеуказанных горючих, также токсичен, что исключает его использование в тактических ракетах; для космического же применения имеются лучшие топлива. Даже не принимая во внимание проблему работы с высоковязкими компонентами, бериллий является сравнительно редким и довольно дорогим материалом, и для него имеются лучшие применения. Разработка таких соединений было бы достойным уважения академическим упражнением, вполне стоящим нескольких кандидатских диссертаций в области неорганической химии, в качестве же программы по разработке топлива она может быть классифицирована только как неудачная трата денег налогоплательщиков.

Итак, какие перспективы видны для «экзотики»? Насколько мне представляется, имеются только два варианта.

1. Возможно, дибораны будут полезны для работы в дальнем космосе.
2. Система пентаборан/гидразин, BN должна быть очень хороша для прямоточных ракет и подобного рода устройств.

И те люди, что потеряли свои последние рубахи на акциях бора, должны будут найти лучший метод извлечения богатства из работы других, моё сердце не обливается кровью по их поводу.

Глава 11

Многообещающие монотоплива

Монотоплива, в отличие от Галлии¹, можно поделить на две группы. Низкоэнергетические используются в качестве вспомогательного источника энергии на ракетах, а также иногда для контроля положения космического корабля (капсула Меркьюри и самолёт X-15 на больших высотах применяли пероксид водорода для управления ориентацией), наддува баков и тому подобному. Высокоэнергетические монотоплива, будучи изысканными ребятами, предназначены конкурировать с топливными парами для основного реактивного движения.

Имелось немного соединений первого рода, и их разработка была произведена более или менее просто. Первым стал, разумеется, пероксид водорода, использованный фон Брауном для привода турбин на А-4. Он применял раствор перманганата кальция для каталитического разложения, но позднее работники Buffalo Electrochemical Co. (BECCO) нашли серебряный экран, покрытый оксидом самария, более удобным для этой цели (я не уверен, был ли самарий выбран как результат систематического исследования всех редкоземельных металлов или по причине того, что исследователь имел нитрат самария на своем складе). Лидерами данного направления были ребята из RMI, исследовавшие пероксид в то же самое время в качестве окислителя для «сверхэффективного» двигателя на борту истребителя. У них имелось одно интересное монотопливное применение для H_2O_2 , в основном сидевшее в их головах. Это была концепция ROR, или «Rocket on Rotor» (реактивный привод лопастей), при которой очень маленькие – возможно, тягой 22 килограмма – пероксидные двигатели были смонтированы на законцовке каждой лопасти вертолёта. Топливный бак располагался во втулке ротора, и центробежная сила должна была обеспечить давление в топливных магистралях. Идеей было улучшение эффективности вертушки, особенно при необходимости в срочном старте (это имеет значение, когда кто-то вас обстреливает). Работа в данной направлении шла с 1952 по 1957 годы, и имел место впечатляющий успех. Я видел вертолёт, оборудованный такой системой, и когда пилот запустил свои ракеты, это зверюга выстрелила в небо подобно шлепнутому по заднице архангелу. По неким причинам данный проект был заброшен, что выглядит безобразно, так как вертушка с системой ROR была бы чертовски полезна во Вьетнаме, где кто-то обычно *обстреливает* вас.

¹Прим. перев. Возможно, автор имеет в виду деление Галлии римлянами на Цизпаданскую, Транспаданскую и Трансальпийскую.

В любом случае, пероксид всё ещё используется как низкоэнергетическое монотопливо, и будет, возможно, продолжать применяться в там, где его высокая точка замерзания не является недостатком.

Одним из таких применением является топливо для торпед (в конце концов, океан – это довольно хороший термостат!). В данном случае перекись разлагается на кислород и перегретый пар, горячие газы крутят турбину, приводящую в действие винты, и торпеда ложится на курс. Но имеется маленькая сложность с данным подходом. Если вы нацелились на корабль, кислород из выхлопа турбины будет выделяться в виде пузырьков на поверхности воды, оставляя прекрасно заметный попутный след, что не только даёт потенциальной жертве шанс на уклонение, но также и указывает ей ваше местонахождение. ВЕССО придумало замечательное решение в 1954 году, добавив достаточно тетрагидрофурана или диэтиленгликола (другие горючие также могут быть использованы) в пероксид для утилизации кислорода, позволяя реакции идти стехиометрически до воды и углекислого газа. Вода (пар) естественным образом не является проблемой, и CO_2 , как известно каждому, кто открывал банку пива, будет растворяться в воде при помощи небольшого давления. Это решило проблему кильватерного следа, но сделало нашу штуку ужасно взрывоопасной и подняло температуру горения до уровня, при котором лопатки турбины будут разрушаться. Так что ВЕССО добавило достаточно воды в смесь для понижения температуры в камере сгорания примерно до 1000°C , когда лопатки могут работать, и разведение водой снизило опасность взрыва до приемлемого уровня.

Ещё одним низкоэнергетическим монотопливом был пропилнитрат, первоначально исследованный в районе 1949 или 1950 года. Он был с энтузиазмом разрекламирован в Англии компанией Imperial Chemical Industries, которая настаивала в его абсолютной безвредности и взрывобезопасности. Ха! – ERDE (Уолтхам Эбби) исследовал его и его гомологи довольно интенсивно, и в нашей стране тоже самое было проделано Ethyl Corporation и Wyandotte Chemical Co. Работа в Англии была проведена с изопропилнитратом, но у нас ввиду значительно усложненной ситуации с патентами использовался именно н-пропилнитрат. К 1956 году не только Ethyl и Wyandotte, но и United Aircraft, ЛРД, NOTS, Аэроджет и Naval Underwater Ordnance Station (бывшая Torpedo Station в Ньюпорте) работали с этим соединением в качестве как вспомогательного источника энергии, так и торпедного топлива, и в форме чистого соединения или смеси с этилнитратом. Он легко инициировался – было достаточно раскаленного инициатора или порции кислорода и запальной свечи – сгорал чисто и гладко, и казался ответом на множество вопросов.

И тут это соединение показало свои зубы. Н-пропилнитрат проходит проверку тестером с карточной прослойкой. Вы можете разбрасывать его, пинать, стрелять сквозь него – и ничего при этом не происходит. Но если имеется маленький пузырь газа, и этот пузырь быстро сжимается – возможно, под воздействием эффекта гидроудара при резком закрытии клапана – то происходит детонация, причем сильная. Это эффект известен как «чувствительность к адиабатическому сжатию», и в данном смысле соединение так же чувствительно, как и нитроглицерин. Это произошло в Ньюпорте, когда кто-то резко закрыл клапан, и н-пропилнитрат не только сработал, и взрыв не только нанёс сильный ущерб, но и большинство

ракетчиков стали убеждены, что монотоплива не для них.

Начиная примерно с 1950 года довольно много внимания в качестве ещё одного монотоплива привлёк оксид этилена C_2H_4O . Он коммерчески доступен по низкой цене и в больших количествах ввиду того, что является важным промежуточным химическим продуктом. Он легко начинает – достаточно искрового инициатора – разлагаться в реакторе на, в основном, метан и монооксид углерода, но имеет, однако, склонность к отложению нагара в реакторе в степени, зависящей от природы поверхности последнего. Данного эффекта можно избежать путем напыления серебра на поверхность камеры – температура пламени очень низка – или при добавлении серосодержащих соединений к топливу. Также вероятно полимеризация в хранилище, при которой формируются вязкие полиэтиленовые эфиры, забивающие всё, что только можно. Компания Sunstrand Machine Tool работала с этим соединением в течение нескольких лет, очень удачно его используя для привода турбины. Experiment Incorporated, Walter Kidde и Wyandotte Chemical тоже проводили исследования, и Forrestal Laboratory в Princeton опробовали его в качестве топлива для прямоточной ракеты в 1954 и 1955 годах.

Некоторая работа была проведена компаниями Experiment Incorporated, Air Reduction и Wyandotte между 1951 и 1955 годами с такими ацетиленами, как метилацетилен и ди-изопропенилацетилен, но все эти соединения не оказывались удачными в качестве монотоплив – образовывалось слишком много нагара даже если они и не решали сдетонировать.

Монотопливом с наилучшей запасенной энергией был гидразин. Луис Данн в ЛРД исследовал его в 1948-51 годах, и это соединение всё ещё используется. Оно может разложиться как на водород и азот, так и аммиак и азот, и отношение этих двух реакций зависит от произвольного набора обстоятельств: давления в камере, каталитических эффектов, времени нахождения газов в камере и т.д. Лучшее всего реакция начинается при пропуске гидразина через слой катализатора в камеру сгорания. Грант в ЛРД в 1953 году придумал первый в разумной степени удовлетворительный катализатор: оксиды железа, кобальта и никеля, размещенные на жаростойкой подложке. Разложение гидразина, разумеется, восстанавливает оксиды до мелко измельченных металлов, которые принимаются за роль катализатора после запуска, но вот перезапуски в случае охлаждения слоя катализатора попросту невозможны. Недавно (с 1962 по 1964 годы) Shell Development Company представила катализатор, позволяющий их проведение – металл иридий, размещенный на подложке, но нет никого, кто действительно счастлив с таким решением. Очень легко «затопить» слой катализатора, пытаясь пропустить через него слишком много горючего и, таким образом, получить неполное разложение или вообще отсутствие оно, и он работает очень плохо с производными гидразина, что вы должны использовать в случае низких температур. И помимо всего этого, иридий редчайший металл из платиновой группы, и данный катализатор ужасающе дорог, и, чтобы просто ради интереса, главным поставщиком иридия является Советский Союз.

Ещё одним путём получения возможности перезапуска может быть «термальная», а не каталитическая, подложка, что обладает высокой возможностью нагрева и теплоизолирована для предотвращения потерь энергии так, что она будет оставаться горячей какое-то время после выключения и начнет снова процесс разло-

жения топлива после перезапуска путём простого нагрева. Для первоначального старта происходит наполнение устройства пентоксидом йода I_2O_5 или йодной кислотой $HI O_3$, каждое из которых самовосламеняется с гидразином. Но если промежуток времени между выключением и рестартом слишком велик – ! Всё, что мы можем теперь сказать, так это то, что удовлетворительную технику для начала разложения гидразина ещё предстоит разработать, так что эта деятельность ещё не закончена.

В течение десяти лет после Второй Мировой Войны достойное уважения количество работы с монотоплива продолжало выполняться в Англии. Британцы не только были очень заинтересованы в перекиси (как в качестве окислителя, так и монотоплива) и в пропилнитрате и его производных, они также были заинтригованы идеей монотоплива, что могло бы заменить топливные пары в основном применении. Уже в 1945 году исследователи прожгли немецкую смесь 80/20 метилнитрата и метанола и пришли к грустному заключению, что это было тем, с чем просто невозможно иметь отношения несмотря на его достойную уважения эффективность.

Затем народ из Waltham Abbey выдвинул ещё одну идею. В ходе войны была разработана жидкая взрывчатка «Dithekites», и ERDE подумало, что она, возможно, могла бы быть хорошим монотопливом. Dithekites являются смесями с соотношением: один моль нитробензола на пять молей азотной кислоты (что делает смесь стехиометрической с получением воды и CO_2) и с различным процентным содержанием воды (например, D-20 с 20 процентами). Даже с такой добавкой смеси не были слишком стабильными, и нитробензол имел склонность к дальнейшему нитрованию. Но британцы тяготели к более легкомысленному (или смелому) поведению в отношении такого рода вещей, чем мы в своей стране, и это не останавливало их существенным образом. Как это не делала и другая опасность, специфическая для Dithekites. Они, разумеется, являются коррозионными и очень сильно воздействуют на человеческую кожу, и, что ещё хуже, чрезвычайно ядовитый нитробензин быстро впитывался через поврежденные ткани в тело жертвы, поражая её, как это и случалось, в один-два сильных удара. Однако, британцы проявляли настойчивость и прожгли данные штуки более или менее удачно в 1949-1950 годах, только лишь выяснив, что если вы добавили достаточно воды в данные смеси для того, чтобы не позволить им оторвать вам голову, полученная эффективность не стоит всех созданных проблем. Конец для Dithekites.

Ещё один вид монотоплива, исследованный ими примерно в это же самое время (в 1947-1948 годах), основывался на смеси аммиачной селитры и топлива, разведенного в воде. Типичной смесью была AN-1 в следующем составе:

Аммиачная селитра	26 процентов
Нитрат метиламмония	50 процентов
Дихромат аммония (катализатор горения)	3 процента
Вода	21 процент

Их эффективность, к сожалению, была настолько плоха, что разработку забросили.

В нашей стране вплоть до 1954 года имели место две основные линии создания высокоэнергетических монотоплив. Первая отпочковалась от работ, описанных в главе 3 и выполненных с целью снижения точки замерзания гидразина. Как было описано, ЛРД и NOTS между 1948 и 1954 годами исследовали смеси гидразина и его нитрата с такой доскональностью, что трудно было более и желать. И было очевидно, конечно, что смесь гидразина и нитрата гидразина имела бы лучшую эффективность в качестве монотоплива, чем чистый гидразин. И когда она была испытана, что произошло в 1950 году, обнаружилось, что данный очевидный факт оказался в самом деле правдой. Имелась только одна загвоздка. Любая смесь, что содержит достаточно нитрата гидразина и малое количество воды для внушающей уважение эффективности более чем вероятно будет детонировать при небольшом воздействии или даже вообще без него. Так что это не было путём к высокоэнергетическому монотопливу².

Несколько лет спустя в конце 50-ых Commercial Solvents, работая на свои собственные деньги (что необычно для топливных дел), и в значительной мере игнорируя сделанное до этого (что *не* является необычными в данной области) придумали серию монотоплив, довольно похожих на гидразиновые смеси за исключением того факта, что они базировались на метиламине, к которому была добавлена аммиачная селитра, нитрат гидразина, нитрат метиламмония или нитрат лития. Они являлись достаточно безопасны, но имели низкую энергетику и эффективность.

Другим направлением работ с высокоэнергетическими монотопливами в нашей стране стало исследование нитрометана. К 1945 году EES, ЛРД и Аэроджет уже работали над этим и открыли, что его чувствительность может быть снижена путем добавления 8 процентов бутанола. ЛРД проделала некоторую работу с данным соединением – определяя оптимальную конструкцию для форсунки и камеры сгорания и т.д. – сразу после окончания войны, и в 1949 году Дж.Д. Тэкери из Аэроджет начал интенсивное исследование, закончившееся в 1953 году. И имелось много чего для изучения.

Большой проблемой было зажигание, запустить данную штуку нелегко. Как обнаружила Аэроджет, вы не могли бы поджечь его с помощью искры без одновременной подачи потока кислорода. Обыкновенные пиротехнические запалы оказались бесполезным, необходим был таковой термитного типа. Одна эзотери-

²Но это кажется подходящим направлением для жидкого пороха. Даже низкоэнергетическое монотопливо обладает бóльшим запасом энергии в расчете на грамм массы, чем бездымный круглый порох, и имеет ещё больше энергетики в расчёте на кубический сантиметр (жидкость гораздо плотнее по сравнению с кучей маленьких зерен). Так что если жидкое топливо было использовано или как часть заряда, или закачено отдельно в камеру пушки перед снарядом, оно должно было бы придать гораздо более высокую скорость на срезе ствола без увеличения массы. Смеси гидразин-нитрат гидразина-вода являлись стандартными топливами в программах по разработке жидкого пороха, хотя и н-пропилнитрат, иногда смешанный с этилнитратом, использовался время от времени. Данные программы проходили, начинаясь и приостанавливаясь, примерно с 1950 года, но так и не были доведены до завершения. Военные запрашивали оружие, программы начинались и выполнялись на протяжении нескольких лет, затем деньги или интерес заканчивались, и всё завершалось только лишь для того, чтобы возобновиться снова по прошествии пяти или шести лет. Я наблюдал три цикла с тех пор, как занялся ракетными делами, и были вовлечены ЛРД, Olin Mathieson, Detroit Controls наряду с различными военными базами Сухопутных Войск и ВВС. Основные проблемы тут лежат скорее в инженерной области, чем в химии.

ческого вида техника, что была ими создана, заключалась в распылении жидкого сплава натрия и калия в камере при запуске. Происходила реакция с нитрометаном с энтузиазмом, достаточным для приведения в действие всей системы – но это не было самой лёгкой в плане обращения субстанцией в мире.

Стабильное и эффективное сгорание в разумно малой камере было ещё одной большой проблемой. Аэроджет опробовала дюжины катализирующих горение добавок, включая такие неожиданные штуки, как перхлорат уранила, и окончательно остановились на ацетилацетонате хрома.

Другие добавки были опробованы в целях снижения точки замерзания и чувствительности данного топлива, среди них нитроэтан и оксид этилена. Обнаружилось, что добавление таких аминов как анилин чрезвычайно усиливают чувствительность, и Фритц Звински запатентовал это в качестве изобретения в области взрывчатых веществ. Окончательно смесь, на которой они остановились, состояла из 79 процентов нитрометана, 19 процента оксида этилена и 2 процентов ацетилацетоната хрома, и ей присвоили угнетающее название «Neofuel».

Мартин и Лаури выполняли для Canadian Defense Establishment похожую работу в 1950 году. Их подход состоял в попытке улучшения эффективности нитрометана, нитроэтана или других нитроалканов путем смешивания с подходящим количеством БДАК (заметьте сходство с Dithiekites). Эффективность было увеличена (нитроэтан оказался самой лучшей нитроалкиловой основой для запуска), но чувствительность смеси сделала невозможным обращение с ней.

Так что весной 1954 года единственным разумным высокоэнергетическим монотопливом, что могло быть использовано с удовлетворительными показателями безопасности, являлось «Neofuel» Аэроджета, и исследование монотоплив, казалось, зашло в тупик.

Затем случилось следующее. Том Райс из Naval Research Laboratory пришел к следующей идее. Он знал, что пиридин чрезвычайно устойчив к нитрованию, и имел основание думать, что если это соединение будет растворено в БДАК, оно скорее перейдет в нитрат пиридина, чем в нитросоединение, а затем в качестве соли должно оставаться довольно стабильным в кислоте. И, меняя количество пиридина в ней, можно получить любое желаемое отношение окислитель-горючее – и создать для себя высокоэнергетическое монотопливо. Том попробовал растворить пиридин с кислотой, получил некоторое шипение и трещание, но без бурной реакции, и подтвердил свою первую гипотезу. Затем он испытал некоторое количество своей смеси в сжигателе нити жидкости³ и обнаружил, что она может гореть как монотопливо. В тот момент времени он не продвинулся дальше ввиду отсутствия доступа к испытательному стенду.

Пол Терлизи, мой тогдашний начальник, посетил NOL и рассказал мне о ра-

³Сжигатель нити жидкости является устройством, что даёт вам некоторую информацию о скорости сгорания монотоплива. Он представляет собой контейнер(баллон) под давлением, обычно с оконцем. Монотопливо сгорает в узкой (диаметром в пару миллиметров) трубке, если трубка не слишком широка, топливо будет выгорать сверху вниз подобно сигарете, и данный процесс можно наблюдать и замерить его скорость. Баллон наддут азотом с давлением, близким к такому в камере сгорания ракеты, и скорость горения измеряется как функция от давления. Данное устройство было создано на основе горелки Кроуфорда для твёрдого топлива. Доктор А.Г. Уиттакер в NOTS прожег, наряду с другими соединениями, смесь азотной кислоты и 2-нитропропана, будучи первым, кто широко использовал данное устройство, что происходило в начале 50-ых.

боте Тома просто по ходу болтовни. Я мгновенно увидел открывшиеся возможности и нечто ещё, что Пол и, вероятно, Том не осознавали. Это был тот факт, что почти любые амины, и не только чрезвычайно стабильные подобно пиридину, могут быть преобразованы в монотопливо в том случае, если их нитраты были бы приготовлены первыми и *затем* растворены в кислоте. И одному только Господу Богу известно, как много имеется аминов!

Я проделал несколько черновых вычислений эффективности и нашел, что триметиламин должен был давать производительность несколько выше, чем у пиридина. Затем я велел своей банде приготовить небольшой образец нитрата пиридина и ещё один для нитрата триметиламина, и смешать их в виде топлива. Это не создало проблем – соли хорошо кристаллизовались и спокойно растворялись в кислоте. Мы по-быстрому взглянули на смеси, увиденное нам понравилось, и затем я уселся и написал письмо в Ракетное Подразделение Бюро Аэронавтики, запросив одобрение на полную проработку вопроса. Это случилось в начале июня 1954 года, я должен был, конечно, ожидать официального решения перед тем, как продвинуться дальше, но так как не было видно никаких особых причин следовать формальным правилам, мы решили начать немедленно и приготовить около полцентнера каждой соли до того, как кто-то примется указывать нам не делать этого. У нас имелось в наличии много пиридина и, по некой неизвестной причине, ёмкость с сжиженным триметиламином, плюс, конечно, неограниченное количество азотной кислоты, так что процесс пошел быстро.

Изготовить нитрат пиридина было просто: просто растворите его в воде, нейтрализуйте с азотной кислотой, выпарите большую часть воды и кристаллизуйте (но однажды во время процесса выкипания что-то пошло не так, смесь начала приобретать коричневый цвет и выпускать угрожающие пары N_2O_4 , и всё должно было быть в спешке вынесено наружу и залито из шланга!). Когда мы получили сухую соль, то растворили её в кислоте в отношении, что давало наилучшую эффективность, и отправили образец смеси Тому Райсу для испытания в его сжигателе нити. Образец сгорел лучше и быстрее, чем тот, что был у Тома. Мы изучили расхождение и нашли, что его БДАК имела в составе больше воды, чем наша.

Данная штука была названа «Пенелопой» ввиду того, что мы очень долго ждали что-то вроде её (конечно же, в оригинальном источнике ждала сама Пенелопа, но мы не будем сильно вдаваться в детали).

Нитрат триэтиламмония получился также просто – за исключением одной маленькой детали. Чрезвычайно летучий триэтиламин намертво впитывался в кожу и одежду и издавал запах подобно рыбному рынку на Фултон Стрит в жаркое субботнее утро (хотя некоторые из нас использовали более приземленное сравнение), и бедный Роджер Макинист, что выполнял работу по изготовлению соли, в течение нескольких недель приветствовался людьми, что зажимали носы одной рукой и указывали на него другой, возглашая – «Нечистый, нечистый!». Мы называли *данное* топливо «Минни» по причинам, что в настоящее время я уже забыл.

В конце концов, мы получили официальное одобрение из Ракетного Подразделения в начале сентября 1954 года. Они настаивали, чтобы мы сконцентрировали свои усилия прежде всего на смеси с пиридином, так что было изготовлено большое количество Пенелопы и передано парням-железячникам для того, чтобы посмотреть, что они могли с этим сделать.

И именно в этот момент ураган Хэйзел свалил самый большой дуб в Нью-Джерси на меня и мою машину марки MG. Мы оба выбыли со службы на некоторое время, и когда я вернулся к работе (с челюстью, всё ещё скрепленной шовным материалом), то выяснил, что произошло.

Видимо, инженеры взяли маленький двигатель – тягой около 22 килограмм – соединили его с монотопливной форсункой и смонтировали горизонтально на испытательном стенде. Затем они воткнули пиротехнический запал в сопло, запустили его и открыли топливный клапан. Топливо соответствующим образом погасило запал. Ещё две попытки дали такой же результат. Затем Берт Абрамсон, отвечавший за испытания, взял ацетиленовую горелку, нагрел двигатель до ярко-красного состояния и открыл топливный клапан. В этом случае он получил зажигание и разрывающую сердце работу двигателя в течение нескольких секунд. Вдохновлённый на дальнейшие усилия, он закрепил около метра литиевого прута в камере и нажал кнопку.

Пенелопа распылилась в камере, собралась в лужицу внизу и *затем* прореагировала с прутком. Сопло не смогло иметь дело со всеми выделенными газами, давление в камере сгорания росло по экспоненте, и реакция превратилась в детонацию высокого порядка, что разрушила двигатель, достигла бака с топливом по трубопроводам, вызвала детонацию *там* (к счастью, имелось только несколько килограмм топлива в баке) и сокрушила практически всё в испытательном боксе. Пенелопу следовало назвать Ксантиппой, кроме того, она до смерти всех напугала – в особенности Абрамсона.

Затем случилось то, что могло бы быть названо агонизирующим пересмотром взглядов. Это заняло несколько месяцев, и затем мы решили проделать ту работу, что должны были выполнить с самого начала. Мною были заказаны образцы каждого подходящего простого амина, что смог найти на рынке, начиная с монометиламина и заканчивая тригексиламином, плюс несколько ненасыщенных аминов, немного ароматики и некоторые производные пиридина.

Как только прибыли первые образцы, я привлек свою банду к работе по изготовлению нитратов аминов, затем преобразованные в топлива. В тот момент должно было быть полдюжины разных колб в лаборатории, каждая с различными нитратами внутри, и всё это булькало одновременно.

Однажды имел место случай, когда мы все сидели за столом посреди лаборатории и обедали. Я поднял голову и заметил, что содержимое одной колбы стало немного коричневым. «Чья эта штука», спросил я (каждый изготавливал свою соль), «за ней нужно приглядывать!». Один из парней начал подниматься, содержимое колбы в этот момент вспенилось и затем успокоилось, вспенилось и успокоилось снова подобно человеку, собирающемуся чихнуть. Я сказал «Всем лечь!», используя нужный тон, все мгновенно подчинились, семь голов стукнулись под столом в тот момент, когда колба и её содержимое со звуком «вууш» оказались на столе. Ничего не было повреждено за исключением самолюбия привлеченного химика, но иногда я удивляюсь, как мне удалось заведовать этой лавкой в течение семнадцати лет без травм на рабочем месте.

Некоторые из нитратов не могли быть превращены в топлива, но начинали реагировать и быстро нагреваться сразу после смешивания с кислотой. Ненасыщенные амины вели себя таким же образом, так же как и некоторые из соединений с

длинными цепочками вроде гексиламинов. Таковые были залиты водой и в спешке захоронены, и однажды нам пришлось звонить в пожарный департамент для того, чтобы это сделать.

Данные соли безумно различались по своим физическим свойствам. Некоторые хорошо кристаллизовались; другие отказывались делать это при любых обстоятельствах, и раствор должен был быть выпарен до сухого состояния над паровой баней, выдавая мелкий порошок. И некоторые соли являлись жидкостями даже при идеальной сухости и комнатной температуре. Нитрат моноэтиламмония был одной из таких – чистой, вязкой, слегка зеленоватой жидкостью. Расплавленные соли не представляют собой что-то новое, но те, с которыми мы имели дело, оказались одними лишь только мне известными, остававшимися жидкими при 25°C. Я так и не нашел применения для этиламинового соединения, но что-то с такими интересными свойствами могло бы стать подходящим для особенного *нечто*!

Но большинство из них растворялись в кислоте без каких-либо на то проблем. Мною изготавливались смеси вплоть до уровня $\lambda=1,00$ (стехиометрические до CO_2 и H_2O), так как ожидалось, что их чувствительность будет максимальной при указанном отношении в смеси, и затем они проверялись на тесте с карточной прослойкой (мы закупили пушечную турель со старого эсминца – в том месте, где мы её взяли, они валялись дюжинами – и установили тестовое оборудование внутри её). Идея турели состояла в том, что она будет сохранять фрагменты из чашки, содержащей тестовые образцы, и позволит найти данные образцы материала после испытания). Прапор-лоботряс, с которым мне пришлось иметь дело, должен был провести данные тесты с карточными прослойками, но Джон Сзок, являвшийся моим безумно трудолюбивым техником и одним из лучших работников, когда-либо виденным мной в лаборатории, проделал большую часть испытаний. И этой работы было много.

Всего он проверил с карточными прослойками около сорока различных смесей в течение того периода времени, пока занимался этой задачей – и вам повезет, если вы сможете закрепить указатель «годится-не годится» для одной смеси меньше чем за дюжину попыток.

Результаты тестов оказались удивительными. Во-первых, Пенелопа, как и родственные ей соединения (производные от пиридина и связанных с ним), была среди самых чувствительных для всех испытанных смесей – одна из них выдало показатель в 140 карт. Во-вторых, топливо, приготовленное из триметиламина (то самое, что я хотел опробовать самым первым) был замечательно нечувствительным – с показателем в, приблизительно, 10 карт. И по мере того, как образцы аминов приходили от производителей, начала проявляться занимательная тенденция. Если вы не принимали во внимание штуки вроде метилциклогексиламина, которые, казалось, не следовали никаким правилам, и рассматривали только те топлива, что сделаны из чистых или с разветвляющимися цепочками алифатических аминов, чувствительность в терминах карточной прослойки оказалась функцией, сильно зависящей от структуры молекулы. Чем длиннее её цепочка, тем более чувствительной была смесь топлив. Изготовленные из пропиламина были более чувствительными, чем произведенные из этиламина, и тот, что был сделан из трипропиламина был чувствительнее такового для производного дипропилами-

на, свою очередь, ещё более восприимчивого по сравнению с изготовленным из монопропиламина. И тот, что был сделан из изопропиламина был менее чувствителен, чем обыкновенная пропиламинная смесь.

Просто сказать, что объяснение таких закономерностей не было очевидным, означало бы недооценивание данной проблемы. Но я продолжил в том направлении, в котором учёный обычно двигается при столкновении с массой по всей видимости необъяснимых числовых данных, и выработал эмпирическую формулу, соотносящую чувствительность с карточной прослойкой с функцией ϕ , названной мною «коэффициентом падулости» и вычисляемой на основе числа углеродных цепочек в ионе аммония, их длины и степени разветвленности (для получения этого я должен был использовать логарифмы по основанию *три*, что является некой настолько странной штукой, о которой не приходилось и слышать. К счастью, логарифмы взаимно сократились и не появились в окончательной функции!). И из данного уравнения вытекало, что с помощью удельной теплоёмкости топлива, размера иона аммония и нескольких предположений я мог предсказать теплоту активации процесса взрыва. Она оказалась вполне разумной величиной – между примерно 20 и 30 килокалориями на моль – как раз в диапазоне прочности молекулярных связей.

Это было любопытно, но что было ещё важнее, мой список кандидатов сократился коренным образом. Начиная с тридцати трёх смесей, и приняв тридцать пять карт в качестве произвольного предела чувствительности, у меня осталось только десять выживших. Некоторых я немедленно отбросил ввиду того, что точка замерзания смеси, приготовленной с оптимальным соотношением, была слишком высока, или по причине нестабильности сухой соли при хранении, или потому, что один кандидат был дороже другого соединения с такой же чувствительностью.

Окончательный выбор был сделан на основе устойчивости к нагреву. Некоторые смеси могли быть выпарены над водяной баней до состояния сухих кристаллов, но другие, когда кислота уже почти исчезала, могли вспыхнуть и полностью сгореть. Это служило некоторым показателем относительной стабильности данных топлив, но для более формальной – и поддающейся количественному измерению – работы мы разработали и построили устройство проверки устойчивости к нагреву. Это был небольшой запечатанный баллон из нержавеющей стали общим объемом примерно в 10 куб. см., оборудованный предохранительным клапаном и записывающим устройством, а также разламывающейся (или разрывающейся) мембраной, срабатывающей при давлении примерно в 20 атмосфер. В баллон загружали 5 куб. см. топлива, помещали его в ёмкость, где поддерживалась постоянная температура, и измеряли рост давления. Имелся открытый «дымоход» над предохранительной мембраной с выходом выше уровня жидкости в ёмкости, так что когда мембрана срабатывала, данная жидкость, что обычно была старым цилиндрическим маслом, не расплескивалась по всей округе.

При типичном прогоне образец размещался в ёмкости при 100°. Всего через несколько минут давление вырастало до значения выше почти 7 атмосфер, и оставалось на таком уровне примерно пятнадцать часов. Затем оно начинало с ускорением расти, и предохранительная мембрана срабатывала на семнадцатом часу. Когда мы провели серию прогонов при различных температурах и затем нанесли на график значения логарифма времени срабатывания против обратной величины

абсолютной температуры, то получили радующую взор прямую линию, из продолжения которой было легко вычислить теплоту активации процесса разложения (которая оказалась удивительно близкой к таковой, полученной в ходе работы с карточными прослойками!).

Так или иначе, мы нашли, что разные штуки более или менее равны, смеси вторичных аминов были устойчивее смесей первичных аминов, и для третичных аминов стабильность была наиболее низкой. И для топлив, что выдержали остальные наши проверки, то, что было изготовлено из диизопропиламина, имело наилучшую устойчивость к нагреву. И это была Изольда (нашим обычаем в то время было называть монотоплива женскими именами – подобно ураганам. Иногда название слегка напоминало вовлечённый амин – подобно, например, Бьюле для бутиламина – и иногда не имелось никакой связи с именами. Роджер Макинист был тем, кто изготовил нитрат диизопропиламина, а поэтому имел неоспоримое право дать ему имя, и так вышло, что накануне он был в опере).

Мы были согласны с этим. Соль Изольда была легка в изготовлении, хорошо кристаллизовалась, и, в целом, работать с ней было одним удовольствием.

В тоже самое время я пытался изобрести какой-нибудь способ её воспламенения без взрыва двигателя, что было непросто. Вы не можете просто поджечь топливо с помощью открытого пламени, даже применяя кислородно-пропановую горелку. Обыкновенные пиротехнические запалы, как нам уже было известно, бесполезны в двигателе. Мы попробовали изготовить несколько на самом деле горячих инициаторов путем смешивания алюминиевого или магниевого порошка, нитрата натрия или перхлората и эпоксидного цемента, и позволяя смеси затвердеть в полиэтиленовой трубке, которая после этого обрезалась. Полученные результаты были впечатляющими. Когда мы подожгли одну из трубок (сделав это с помощью нагретого электричеством прута), то получили яркое белое пламя, облака белого дыма и всевозможные звуки. Мы опробовали их сразу за дверью лаборатории и всегда держали наготове одного из нас готовым встретить любого, отвечавшего за безопасность и прогуливавшегося рядом. Берт Абрамсон пришёл для проведения показа и, когда один из запалов вышел из под контроля, попытался потушить его с помощью промывочной бутылки. Сразу после этого инициатор разломился на две части, горящий кусок упал на пол и начал гоняться за Бертом по лаборатории под всеобщее веселье. Но эти инициаторы не работали – поток Изольды тушил пламя.

Очевидно, что было попросту непрактично поджигать данную штуку при помощи внешнего источника энергии. Она должна была сама выделять энергию, что означало разработку нами некоторого источника самовоспламеняющегося зажигания. Мы не хотели создавать сложности с системой трубопроводов, что возникли бы в случае использования нами запала из, например, НДМГ для реагирования с кислотой в топливе; это вело бы к слишком большому усложнению. Что мы хотели, так это некий твёрдый материал, заблаговременно помещённый в камеру и реагировавший, начиная гореть, с топливом при его впрыске. Были опробованы всевозможные кандидаты – порошок магния, металлический натрий и всё, что только возможно ещё (кандидат помещался в горизонтальную стеклянную трубку диаметром в один-два дюйма (около 25-50 мм), топливо распылялось на одном конце, и полученные результаты записывались с помощью высокоскоростной ка-

меры). Нам не везло с некоторыми вещами, но затем, в конце концов, мы достигли успеха с самой необычной работающей смесью из гидрида лития и резинового клея. Данная невероятно звучащая смесь была приготовлена в виде тонкой пасты, размазана на куске марли и затем обернута вокруг деревянного штифта, конец которого заточили и закрутили в запал с нарезанной трубной резьбой в 1/8 дюйма (3 мм). Этот запал был, в свою очередь, закручен в подходящим образом нарезанное отверстие в центре форсунки, так что при впрыскивании топлива оно бы пришло в контакт и среагировало с инициализирующей смесью. Всё устройство длиной примерно в 6 дюймов (около 150 мм) хранилось в запечатанной для защиты LiH от атмосферной влаги тестовой трубке до того момента, когда оно бы понадобилось. Её работающий конец цветом был как жуткий серый труп, и это оказался самый непристойно выглядящий объект, что я когда-либо видел – и ракетные механики окрестили его соответствующим образом⁴.

Но это работало. Мы провели первый удачный запуск в январе 1956 года и к апрелю получили работающую систему с гладким процессом. Наилучшие результаты были достигнуты с топливом, изготовленным из безводной кислоты (по сравнению с обыкновенной БДАК) и с такой смесью соли/кислоты, что имела λ (коэффициент снижения окислительной валентности в топливе) равный 1,2. Так что мы называли эту смесь Изольдой 120 А (число 120 отсылало к коэффициенту смеси и А к безводной⁵ кислоте) и написали свои отчёты, и у нас было нечто особенное для этого – монотопливо с наивысшей эффективностью из когда-либо кем-то испытанных. Сгорание было хорошим – мы получили эффективность, близкую к 95 процентам от теоретической, с удивительно малой камерой – и не нуждались в хитроумной (и дорогой) форсунке. В действительности, мы использовали только одну, изготовленную из шести доступных в продаже распылителей для масляной горелки ценой в семьдесят пять центов каждый.

Наши отчёты (мой был посвящен разработке топлива и запала, методам анализа данного топлива, результатам с карточной прослойкой и т.д., и отчет инженеров описывал работу двигателей) были одновременно выпущены в ноябре 1956 года, но все в данной области имели весьма хорошее представление о том, что было нами сделано, к июню. И затем разверзлась геенна огненная.

Все вокруг захотели принять участие и направили запросы на исследовательские программы для монотоплив в одну из трёх служб. RMI, что находилась прямо по соседству с нами, и близко знакомая с нашей работой, сделала это первой в марте 1956 года когда получила контракт ВМФ на разработку «более мощных жидких монотоплив», но и другие не слишком отставали. Компания Wyandotte Chemical подписала контракт с ВМФ к сентябрю, Phillips Petroleum и Stauffer Chemical вышли на сцену в начале 1957 года, и к 1958 году Pennsalt, Midwest Research, Аэроджет и Hughes Tool присоединились к ним. В дополнение к этим компаниям, что

⁴Так как топливо было названо «Изольдой», одним лишь разумным именем для инициатора выглядел «Тристан». Затем кто-то заметил мне, что ракета, использующая данную систему, естественным образом должна быть названа «Королём Марком». Но когда кто-то ещё добавил, что улучшенная модель ракеты, конечно же, должны быть именована «Королём Марком II», инженер-механик начал задумчиво бормотать о порках на решетках, протаскивании под килем и применении нок рей, и идея о «Тристани» умерла преждевременной смертью.

⁵Прим. пер. В оригинале безводная кислота – Anhydrous Acid.

все пытались вывести новые виды топлив, несколько организаций, включая GE, проводили тесты горючих, разработанных другими, в двигателях и пытались применить их в тактических системах. Это было загруженное время.

Компания Reaction Motors (вскоре они занимались не только программой монотоплив ВМФ, но также заполучили контракт с Сухопутными Войсками) опробовала два подхода. Один состоял в растворении топлива в окислителе, и другой в создании топлива из одиночного соединения – нитрата или нитрамина энергетического радикала. Пропаргилнитрат, пропаргилнитрамин, глицидилнитрат, 1,4-динитрато-2-бутин и 1,6-динитрато-2,4-гексадиин являются типичными созданными ими чудовищами (прочтения имен уже достаточно для появления пота на лбу человека, работающего с топливами!).

Мне не верится, что они когда-либо проводили достаточно проверок с картонными прослойками, но результаты некоторых других тестов были весьма тревожны. Джо Писсани позвонил мне однажды из RMI поздно вечером в 1958 году, спрашивая, смогу ли проверить устойчивость к нагреву у образца нитрата пропаргила. Я ответил, что был бы рад, но он должен будет заменить всё сломанное, так как я не доверяю этой штуке. Так что он прислал нам свой образец объёмом только в 3 куб.см (обычно мы использовали 5 куб.см) но, вероятно, нам с этим повезло. Джон Сзок нагрел масляную емкость до 160°C (температуры наших обычных тестов), загрузил образец в баллон, поместил последний в ёмкость и убежал обратно в лабораторию, закрыв за собой дверь. (по очевидным причинам, установка проводилась в действие снаружи, а не в самой лаборатории). Он включил самописец и начал наблюдение. Продолжительное время ничего не происходило, давление медленно росло по мере нагрева и затем, казалось, стабилизировалось.

И затем произошла оглушительная детонация. Мы увидели через окно из защитного стекла большое красное пламя в тот момент, когда масло вспыхнуло огнём только для того, чтобы немедленно потухнуть при попадании на холодный как лёд бетон. После чего нами было всё отключено, и мы вышли наружу для оценки ущерба. Баллон был разорван на части; предохранительная мембрана просто не смогла достаточно быстро лопнуть. Измеритель давления был разрушен, также как и устройство для перемешивания. Цилиндрический резервуар из нержавеющей стали, что содержал масло, поменял форму на то, что хорошо смотрелось бы, будучи поставленным под кровать. И масло – а это было старое масло из вакуумного насоса, чёрное и загрязненное – расплескалось на бетонный пол испытательной зоны, стену здания и всё остальное в зоне доступности и самостоятельно превратилось (температура было сильно ниже точки замерзания) в нечто, напоминающее дорожный гудрон. Я взял в руки телефон.

«Джо, ты помнишь ту штуку, что послал мне для проверки устойчивости к нагреву? Ну, во-первых, в этом смысле она никакая. Во-вторых, ты должен мне новый баллон, захват Вианко, смесиватель и, возможно, что-то ещё, что мне придет в голову позже. И, в-третьих, (*крещендо* и *фортиссимо*) ты пришлешь пару студентов-двоечников в течение пятнадцати минут для уборки всей этой (биип) разрухи, или же я появлюсь у тебя с ржавым полотном ножовки ...» Я описал анатомические детали, к которым данный инструмент будет применен, и разговор на этом закончился.

И это стало концом пропаргиллов и их производных. Вашингтон велел Reaction

забыть данную глупость и вместо этого начать работать над N-F соединениями, чья история будет рассказана немного позже.

Ещё один подход к разработке монотоплив в RMI был применён Стэном Танненбаумом, опробовавшим смеси инертных (как он надеялся) окислителей и горючих. Это была химия в ванной комнате, включающая немного синтеза или вообще его отсутствие, но требующая железных нервов. Данный подход имел то очевидное преимущество, что стехиометрический состав мог быть скорректирован прямо по ходу дела и не был ограничен, как в случае однокомпонентных монотоплив, устройством молекулы. И данная идея не было совершенно новой, французы в ходе Первой мировой войны применили самолетные бомбы, наполненные смесью N_2O_4 и легкого бензина (состав был настолько чувствителен, что две жидкости не смешивались вместе до момента сброса бомбы с самолёта). И так случайно произошло, что за несколько лет до того, как я занялся монотопливами, оптимистично настроенный изобретатель пробовал продать мне данную смесь в качестве монотоплива, утверждая, что она была не опаснее материнского молока. Но я её не купил.

Стэн работал с N_2O_4 и перхлорилфторидом и обнаружил, что мог смешать бициклооктан или декалин в N_2O_4 без возникновения немедленных проблем, но данная смесь была слишком чувствительной для того, чтобы иметь с ней дело. Он опробовал тетраметилсилан в надежде (так и не реализованный), что тот будет безопаснее, но окончательно и с сожалением пришел к выводу в конце 1959 года, что вы не могли приготовить монотопливо, базируясь на N_2O_4 . Говард Бост в Phillips Petroleum, работавший со смесями N_2O_4 и неопентама или 2,2-динитропропана, пришел к такому же выводу в тоже самое время, и если были необходимы дополнительные свидетельства, то количество карточных прослоек для различного рода смесей N_2O_4 , найденное МакГонигом из Allied Chemical, могли таковыми служить.

Ему не удалось продвинуться дальше с перхлорилфторидом. Вначале он попробовал смешать его с аминами, но выяснил, что когда они полностью его растворяют, то немедленно начинается реакция с окислителем. Стэн мог растворить углеводороды или эфиры, но смеси являлись чувствительными и слишком опасными в обращении (точно такое открытие были сделано Джeneral Электрик, когда смесь перхлорилфторида и пропана сдетонировала, серьезно ранив оператора). Так что данный подход оказался тоже безнадежен, так же как и хорошая идея попробовать смешать N_2F_4 с монометилгидразином, что Стэн обнаружил в начале 1959 года!

Если смеси Танненбаума были плохи, то таковая, предложенная на конференции, посвященной монотопливам и проходившей в октябре 1957 года, одним оптимистом из Air Products, Inc., буквально поднимала дыбом волосы на голове у всех, занимавшихся топливом. Он предположил, что смесь жидких кислорода и метана должна быть высокоэнергетическим монотопливом, и даже отработал фазовую диаграмму системы⁶. Каким образом он не совершил самоубийство (самым первым правилом в обращении с жидким кислородом является то, что вы ни за что не позволяете ему придти в контакт с потенциальным горючим) являлось интерес-

⁶Его идея состояла в установке завода по производству жидкого кислорода рядом с источником природного газа, наполнении баков МБР на стартовой площадке и нажатии кнопки.

ным вопросом, в особенности после того, как ЛРД позднее продемонстрировала, что можно было вызвать детонацию смеси просто осветив её ярким светом. Тем не менее, десять лет спустя я прочёл статью, где на полном серьёзе предлагалось кислородно-метановое монотопливо! По всей видимости, молодые инженеры испытывают аллергию к истории своей собственной области⁷.

Работа, выполненная Чарли Таитом и Биллом Кадди в Wyandotte, и близко не была столь пугающей, как сделанная в Air Products, и приблизилась к тому, что успокоило бы достаточно благоразумного человека. Для одной вещи Билл, подобно Джо Писани, синтезировал некоторые такие на самом деле любопытные органические нитраты, как 1,2-динитратопропан и нитроацетонитрил, и, как и можно было ожидать, обнаружил, что никто в здравом уме не станет пробовать использовать их в качестве горючего. Для ещё одного он исследовал возможность (по общему мнению, слабую) применения алкиловых перхлоратов по типу этилперхлората $C_2H_5ClO_4$ в качестве монотоплива. Я прочел в отчете Wyandotte, что они собирались это сделать, и позвонил Биллу для того, чтобы зачитать то, что Сидгвик сказал в «Chemical Elements and their Compounds» в отношении данного этилового соединения.

«Хар и Бойли (1841) утверждают [писал Сидгвик], что оно несравнимо более взрывоопасное по сравнению со всеми другими известными субстанциями, каковое до сих пор кажется очень близким к истине... Мэйер и Спорманн (1936) отмечают, что взрывы сложных эфиров перхлоратов громче и разрушительнее, чем у любых других соединений; было необходимо работать с минимальными количествами под защитой тонких перчаток, железных масок [Ха, привет месье Дюма!] и тонких очков, и иметь дело с ёмкостями при помощи длинных захватов.» Но Кадди (возможно, вначале вложившись в кожаные перчатки и железную маску) всё равно пошел дальше. Он говорил мне позже, что было достаточно легко синтезировать сложные эфиры, но он и его команда так и не смогла прожечь их в двигателе по причине постоянных детонаций перед тем, как они могли быть залиты в топливный бак. Будет излишним добавить, что данное направление исследования не получило продолжения.

Система, над которой они работали больше двух лет, основывалась на растворе топлива в тетранитрометане – штуке, не означавшей ничего, кроме неприятностей для всех, кто когда-либо имел хоть что-то с ней, и Билл с Чарли получили свою порцию проблем.

Другим опробованным горючим был нитробензол. Он отлично растворяется в тринитрометане для изготовления топлива с подходящим балансом кислорода, и раствор казался достаточно стабильным. Но когда они проверили его на картонные прослойки, то обнаружили, что чувствительность была выше 300 карт (в своей собственной работе я категорически отказывался иметь дело с чем-то со зна-

⁷Несколько позже Ирв Глассман из Forrestal Laboratories задумал интересный и совершенно новый тип криогенного монотоплива. Идея состояла в использовании ацетилена в избытке жидкого водорода. Когда они реагируют, то продуктами являются метан, который с избытком водорода становится рабочей жидкостью, в то время как теплота разложения ацетилена плюс таковая у формирования метана будет источником энергии. Рассматривая теоретическую эффективность, видно, что температура в камере должны была бы быть замечательным образом низкой. Данная идея, однако, так и не была проверена экспериментально.

чение карточной прослойки выше 30). Ацетонитрил, выбранный ими в качестве горючего (они вычислили эффективность дюжин возможных вариантов и опробовали несколько из них) не был настолько безнадежен, как нитробензол, но всё ещё был весьма плох. Но примерно в это же самое время некоторые люди в области монотоплив, будучи проклинаемыми за изготовление чего-то безумно опасного, беспечно отвечали – «Конечно же, мне известно, что оно чувствительно, но инженеры могут обойти эту проблему при конструировании.» (причем инженеры имели об этом смутное представление).

Так что они всё-равно двинулись дальше и в самом деле сумели прожечь данную штуку в микродвигателе – в большинстве случаев. Иногда же и, к их смущению, во время демонстрирования посетителям, происходил ужасающий взрыв, разрушавший двигатель и оборудование и пугавший всех до полусмерти. Таит и Кадди работали до кровавого пота, но так и не смогли превратить смеси тринитрометана в надежные топлива, и в конце 1958 года направления их деятельности были смещены в сторону аминонитратов.

Если Таит и Кадди боролись за дело, заранее обречённое на неудачу, то Джек Гулд из Stauffer точно должен был курить мексиканскую травку Акапулько Голд, и его исследования являлись чистейшей воды фантазиями, что подходящим образом могли быть описаны только Льюисом Кэрролом. У Джека имелся контракт с ВМФ на разработку «высокоэнергетического монотоплива», и его усилия на этом направлении являются вызовом устоявшимся представлениям. Наиболее здравым из опробованного ими было растворение NH_3 в NF_3 . Они оба вполне стабильные соединения, и он мог бы получить высокоэффективное и в разумной степени безопасное топливо. К сожалению, аммиак не будет растворяться в NF_3 ни при каких условиях. После этого:

Он попробовал изготовить боргидрид нитрония NO_2BH_4 и не смог этого сделать (идея состояла в получении стабильной соли с окисляющим катионом, и сокращение аниона не особенно внушает доверие перед лицом данного факта.).

Он попытался смешать пентаборан с нитратом нитроэтила, что взорвался при контакте (сам по себе нитрат нитроэтила выдавал около 50 карт в тесте на чувствительность).

Он попробовал смешать NF_3 и диборан, которые прореагировали.

Он попытался смешать нитрат нитроэтила с аминными производными различных боранов. Они прореагировали или взорвались.

И так далее до бесконечности. И в каждом квартальном отчете он перечислял много возможных соединений вроде диимида $\text{H}-\text{N}=\text{N}-\text{H}$, что могли бы быть прекрасными топливами, если бы вы только сумели их создать. В конце концов Ракетное Подразделение, будучи сытыми по горло, велели ему покончить с такого рода глупостью и вместо этого начать работать над системами NF , что он и делал начиная примерно с конца 1958 года.

В то время, как всё это продолжалось, аминонитратные монотоплива привлекали довольно сильное внимание – и ими занимался не только в NARTS. В Джене-рал Электрик взялись за дело и начали работу с двигателями, пробуя использовать Изольду в новейшей разрабатываемой ими конструкции с автономной подачей топлива (они взорвали свою установку, что показывает неудачность идеи попытки создания нового типа двигателя с экспериментальным топливом. Одной неизвестной в данный момент времени уже вполне достаточно для беспокойства!).

Даже ещё до того, как был выпущен отчет об Изольде, Бост и Фокс из Phillips Petroleum изготовили нитратные соли некоторых своих би-третичных аминов и растворили их в азотной кислоте, получив свои собственные аминонитратные топлива. Они открыли, однако, чрезвычайно низкую устойчивость к нагреву, что соответствовало нашему опыту для третичных аминов. Также они обнаружили высокую вязкость их динитратных растворов, что мы выяснили на очень раннем этапе работ при попытке изготовления топлива из этилендиаминa.

В NARTS инженеры пахали, проверяя Изольду в двигателях с высоким давлением – 68 атмосфер вместо 20 – и в качестве регенеративного охладителя. Она *могла* использоваться таким образом, но процесс был отчасти сомнительным. Вы должны были выключить систему, промывая её водой, или же топливо, оставшееся в охлаждающих трактах всё ещё горячего двигателя, могло приняться за дело и, возможно, разнести на куски сделанную работу.

Всё это было достойно высшей похвалы, но не слишком интересно для кого-либо, кроме торговца оборудованием, которым я не был. Так что я решил посмотреть, могут ли четвертичные нитраты аммония быть лучшими топливами, чем их вторичные собратья. Мы не исследовали четвертичные соединения так как они сравнительно сложны в приготовлении, и не было умоузырительной причины верить в их преимущества или недостатки по сравнению с Изольдой. Но был только один путь это выяснить.

У нас имелось немного гидроксида четвертичного аммония в лаборатории, так что я изготовил из него нитратную соль – она превосходно кристаллизовалась – и приготовил на её основе топливо. У нас не оказалось достаточно топлива для работ с карточной прослойкой, но мы опробовали его в устройстве для проверки устойчивости к нагреву. И были шокированы.

Оно было невероятно устойчивым. В то время как Изольда срабатывала в течение пятнадцати минут при 130°, новая штука просто оставалась стабильной, и при 160° она могла находиться более недели в состоянии, когда ничего не происходило (Изольда сдавалась после двух минут при 160°).

Это было просто замечательно, и мы стали оглядываться вокруг в поисках путей получения большего количества данного соединения. Нитрат тетраметиламмония не был коммерчески доступен – не было причин, по которым кому-то он мог понадобиться до этого – но имелся хлорид, и я заказал достаточно его для конвертации в то разумное количество соли, что было нам нужно. Конверсия являлась достаточной простой даже с учётом того факта, что мы применили много дорогого нитрата серебра для изготовления соединения (позднее, столкнувшись с проблемой заказа серебра, мы смогли использовать его снова и снова) и скоро обладали топливом в достаточном количестве для проведения проверок с карточной прослойкой. И наше новое горючее при $\lambda=1,2$ имело чувствительность около пяти

карт, означавшее, что давление ударной волны, необходимое для его инициации, было в два раза выше давления, приводившего к детонации Изольды⁸. Будучи чрезвычайно обрадованными, мы нарекли её «Таллулой» (по причине практически полной невосприимчивости к удару) и продолжили в том же направлении, что случилось в начале 1957 года.

Единственной проблемой с Таллулой было то, что будучи смешанной при значении $\lambda=1,20$, она давала слишком высокую точку замерзания – около -22° (такой замечательно симметричный ион едва ли может быть удержан от кристаллизации). Так что в качестве следующего шага мы опробовали соль этилтриметила («Порция», но не спрашивайте у меня объяснения изменчивой цепочки причин, приведшей к данному имени!) и нитрат диэтилдиметиламмония («Маргарита», и не просите у меня объяснений тоже). Порция не вполне годилась – она выполняла бы требования к точке замерзания при $\lambda=1,10$, а не при $\lambda=1,20$, также она плохо кристаллизовалась и была довольно гигроскопичной. Маргарита отлично удовлетворяла условиям точки замерзания, но очень плохо кристаллизовалась и являлась настолько гигроскопичной, что это делало её применение практически невозможным.

Данные соли были изготовлены для нас внешними производителями, имевших работающее под давлением оборудование, что отсутствовало у нас, и при этом бывшее совершенно необходимым для выдачи четвертичных соединений в произвольном количестве. Джон Гэлл в Pennsalt и доктор Филлис Ойя из Dow были оба чрезвычайно полезны в обсуждении путей организации производства данных солей на их перспективных опытных заводах и компенсации понесенных финансовых потерь (мы получили эти соли за гораздо меньшую цену, чем они обошлись производителям в изготовлении).

Так как Маргарита имела плохие физические свойства, более компактный и симметричный изомер мог бы работать лучше, и нитрат триэтилпропиламмония был следующей опробованной нами штукой. Он имел подходящие свойства

⁸Примерно в это же время мне стало интересно, могли ли или нет отношения между структурой и чувствительностью, найденные мной для монотоплив на основе нитратов аминов, быть применены к другим системам, в особенности по причине указания мне МакГониглом, что углеводороды с прямыми цепочками в N_2O_4 были чувствительнее таких же с разветвленными цепоч-

ками. Мне было известно, что Таллула при $\lambda=1,0$ со структурой иона топлива $CH_3 - \overset{\overset{CH_3}{|}}{N^+} - CH_3$
 $\quad \quad \quad |$
 $\quad \quad \quad CH_3$

выдавала около восьми карт при тесте с прослойкой, в то время как топливо с изомерным ионом $NH_3^+ - CH_2 - CH_2 - CH_2 - CH_3$ имело показатель 58 – разница почти на пятьдесят карт только по причине различий в структуре. Так что я взял обычный пентан $CH_3 - CH_2 - CH_2 - CH_2 - CH_3$ и неко-

торый неопентан $CH_3 - \overset{\overset{CH_3}{|}}{C} - CH_3$
 $\quad \quad \quad |$
 $\quad \quad \quad CH_3$, смешал каждый их них с N_2O_4 до $\lambda=1,0$ и затем подверг про-

верке с карточной прослойкой. И обыкновенный пентан имел чувствительность примерно в 100 карт, а неопентан – 50 карт. И снова была разница в 50 карт, что означало, что отношение критического давления ударной волны к структуре был одинаковым для обеих систем. Я был зачарован данным совпадением, но не имел шанса продолжить данную работу далее. К этому следует привлечь внимание для каких-нибудь исследований в будущем.

– хорошую точку замерзания, отличную устойчивость к нагреву, слегка более высокую по сравнению с Таллулой чувствительность в карточных прослойках, но не слишком от неё отличающуюся для того, чтобы это имело значение, и физические свойства оказались замечательными для обращения с ним. Мы назвали это соединение «Филлис» (в конце концов, когда некая леди велит своим работникам приготовить около 70 килограмм совершенно им незнакомой соли, и затем ничего за это не заплатит на том основании, что документооборот будет стоить дороже самой штуки, по крайней мере джентльмены могут назвать полученный результат в честь самой леди!).

В конце 1957 года Филлис выглядела наиболее многообещающей, но мы продолжали поиски. В течение всего 1957 года и затем ещё три года мы носились, собирая вероятно подходящие амины, четвертируя их и проверяя. Обычно мы изготавливали количество, необходимое для первоначальной проверки устойчивости к нагреву и определения точки плавления, и затем, если соединение проходило данные тесты (большинство из них этого не делало), готовили в количестве, достаточно большом для работы с карточной прослойкой. И если кандидат показывал себя хорошо в этой проверке, наступало время поиска кого-то, кто мог бы синтезировать количество, достаточное для работы в двигателе.

В январе 1958 года Бост и Фокс из Phillips в рамках нового контракта BBC с энтузиазмом вернулись к теме монотоплив. Компания Phillips, конечно же, имела всё то замечательное оборудование, что только можно человеку и пожелать, и парни могли работать быстро. Например, как только им было нужно получить го-

рючее на основе иона
$$\begin{array}{ccccccc} & \text{C} & & & \text{C} & & \\ & | & & & | & & \\ \text{C} & - \text{N}^+ & - \text{C} & - \text{C} & - \text{N}^+ & - \text{C} & \\ & | & & & | & & \\ & \text{C} & & & \text{C} & & \end{array}$$
 (водород, как обычно, опу-

щен в целях упрощения), то они просто осуществляли реакцию хлорида этилена с триэтиламином практически в любом растворителе под давлением и получали желаемое. Мы завидовали их оборудованию и проклинали богатство нефтяной индустрии. Так или иначе, они синтезировали порядка дюжины различных нитратов четвертичных аминов, растворили их в азотной кислоте и проверили свойства. Они проделали некоторую работу с перхлоратами, но обнаружили, что все они были слишком чувствительны; также имела место некоторая деятельность с N_2O_4 и смесями N_2O_4 - H_2O , но было найдено, что нитратные соли не были достаточно растворимы в N_2O_4 для изготовления топлива, и что когда достаточно воды добавлялось для растворимости, терялось слишком много энергии. Так что они самостоятельно сменили направление исследования на тот же тип систем, над которыми работали мы сами, и в течение года или двух обе программы шли вместе более или менее параллельно – они работали над двухсторонними топливами, мы имели дело с односторонними соединениями.

Новичком в данной области был Дж. Нефф из Hughes Tool (да, да – компании Говарда Хьюза⁹). В начале 1958 года, имея на руках контракт с ВМФ и не испытывая недостатка оптимизма, он начал работу по разработке монотоплива на основе

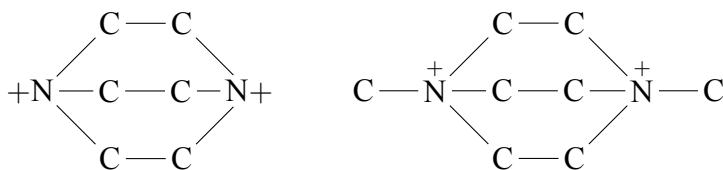
⁹Прим. перев. Если читателю незнакомо данное имя, то можно обратиться к вышедшему в 2004 году автобиографическому фильму Мартина Скорцезе «Авиатор» с Леонардо ДиКаприо в главной роли, посвященному истории жизни Говарда Хьюза.

бора и азотной кислоты. Программа проводилась в течение полутора лет, и хотя она не привела к практически применимому топливу, имела место некоторая интересная химия. Его самый близкий к успеху подход основывался на карборановой структуре, где два атома углерода располагались с десятью атомами бора в структуре декаборана в форме открытой корзины, формируя закрытую икосаэдрную ячейку из двенадцати атомов (см. главу, посвященную боранам). Можно присоединить диэтиламинметиловую или диметиламиноэтильную группу к одному или обоим атомам водорода, затем приготовить нитрат данного соединения и растворить эту соль в азотной кислоте. В некоторых случаях ему удавалось сделать это безнаказанно, хотя было возможно воспламенение при слишком быстром смешивании компонент. Но его растворы оказывались нестабильными, они или выделяли газ при небольшом нагреве, или распадались на два слоя, или делали что-то ещё, что подчеркивало неправильность выбранного пути создания монотоплива. Его работа так и не достигла стадии испытания в двигателе.

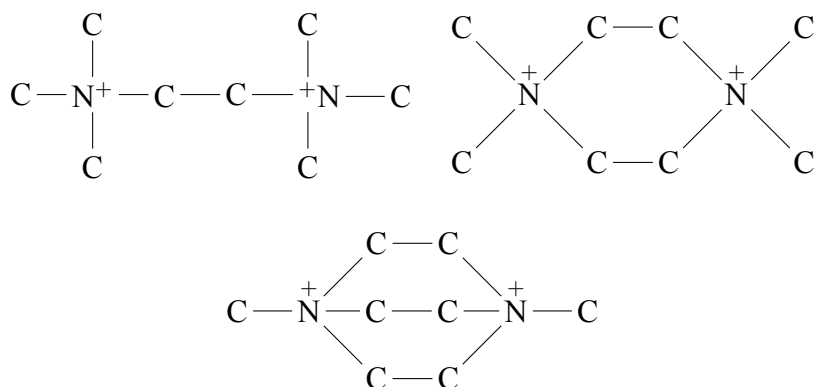
Так же как и не удалось этого сделать в ходе разработки Аэроджет монотоплива для ВВС. В конце 1958 года М.К. Барш, А.Ф. Граеф и Р.Э. Ятс начали исследование некоторых ионов бора вроде $[\text{BH}_2(\text{NH}_3)_2]^+$, намереваясь приготовить нитраты и растворить их в азотной кислоте. Имелось целое семейство таких ионов, иногда с гидразином вместо аммиака, некоторые из них содержали более одного атома бора, и т.п., и хлорид иона, указанного выше, может быть получен путем совместного измельчения борогидрида лития и хлорида аммония в шаровой мельнице. Макс Барш и Ко. назвали данные ионы «Nercats» от «High Energy Producing CATions» (катионы, производящие много энергии) (моя достойная сожаления привычка нарекать топлива причудливыми именами была, по всей видимости, подхвачена!). Потом они проделали несколько попыток синтеза алюминиевых аналогов некоторых ионов без какого-либо на то заметного успеха. Но, к сожалению, к концу июля 1959 года выяснилось, что эти топлива не были стабильными даже в воде, выделяя азотную кислоту или N_2O_4 , что стало концом для Nercats.

Как мною уже говорилось, Филлис казалась наиболее многообещающим доступным аминонитратом в начале 1958 года, и к концу этого года это соединение наряду с Таллулой успешно прожгли NARTS и Спенсер Кинг из Hughes Tool. «Этан» Говарда Боста также был испытан и, если принимать во внимание производительность, сложно было сделать выбор между ними. Мне не кажется, что кто-то когда-либо проверял как Порцию, так и Маргариту. В большинстве тестов указанных монотоплив зажигание производилось с помощью запала на основе НДМГ, этот подход был, конечно же, сложнее по сравнению с использованием нашего инициатора «Тристан», но существенно более надежными при работах в ходе стендовых испытаний.

Следующим в ходе разработки принял эстафетную палочку Джон Гэлл, работавший в Pennsalt, который летом 1958 года послал мне для исследования образцы двух нитратов аминов. Их ионы показаны ниже:



Имела место небольшая задержка – один из членов моей банды облажался и изготовил тестовые топлива в неправильной пропорции, так что мы должны были запросить ещё один образец – но, в конце концов, нам удалось прогнать тесты на устойчивость к нагреву. Нитрат третичного амина, конечно же, не был хорош, но четвертичный оказался стабилен по крайней мере на уровне Таллулы. Затем мне пришло в голову, что могло бы быть интересным сравнить три различные, но очень близкие к друг другу, ионы, приведенные ниже, что могут быть представлены как два иона Таллилы, соединенные одной, двумя или тремя связями соответственно:



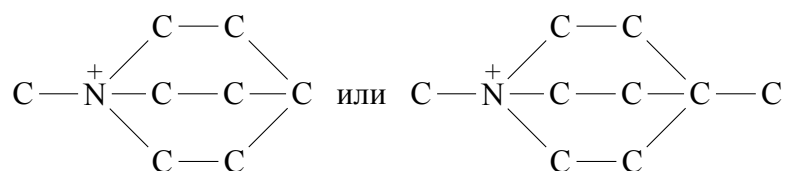
Майк Волш из моей лаборатории анонсировал наши намерения проделать вышесказанное на конференции ARS в середине сентября, и мы сразу же принялись за работу. Нитрат первого иона был легко доступен: это была соль «Этана» Говарда Боста. Что касается третьего иона, мы получили ещё один и больший образец от Джона Гэлла. Второй ион не был до этого доступен, но компания Jefferson Chemical Co. изготовила N,N'-диметилпиперазин, и не составляло никакой сложности кватернизировать его и получить нужную соль. Так или иначе, но мы приготовили топлива и опробовали их в установке по проверке на устойчивость к нагреву при 160°. Номер 1 сдался через чуть более 2 часов, номер 2 продержался около двух минут. И номер 3 просто находился в установке и ничего не делал до тех пор, пока мы полностью не сдались и по прошествии трех дней не отключили установку.

Это было чре-ззз-вычайно интересно – возможно, мы получили нечто, что было круче даже Таллилы. Так что мы изготовили его при $\lambda=1,2$ и проверили на карточную прослойку. И, к нашему изумлению, обнаружили, что оно не детонировало даже при нуле карт, и это было не то, что интересно – это была сенсация. Точка замерзания -5° оказалась плохой, но мы обнаружили, что данную проблему можно определенным образом обойти, и это не уменьшило наш энтузиазм.

Теперь стало необходимо подобрать хорошее имя. Никто, что являлось само собой разумеющимся, не собирался называть его формальным обозначением 1,4-диаза-1,4-диметилбицикло-2,2,2-октандинитрат. Данный ион имел замечательно симметричную структуру в форме замкнутой ячейки, так что я именовал его «Кавиа» (что, кроме всего прочего, звучит слегка женственно), отталкиваясь от латинского слова «ячейка». Никто не протестовал – это слово было легко запомнить и произнести, хотя куча народу спрашивала меня о его значении!

Мы прошли через обычную процедуру, сжигая соль в калориметре для определения теплоты формирования, измеряя энергию, выделявшуюся при растворении соли в кислоте (эти два значения позволяли нам сделать достаточно точные вычисления эффективности), замеряя плотность и вязкость топлива как функции от температуры и всё такое прочее. И всё было в порядке за исключением точки замерзания.

Одна героическая попытка переменить ситуацию заняла месяцы и совершенно ничего не дала. Я рассудил, что ион с простым окончанием вроде



приведет к топливу с для всех подходящей точкой замерзания. Сложность лежала в получении нитратов любого из указанных ионов. Я провел в поисках месяцы прежде чем нашел оборудование, что позволило бы – или могло позволить – мне изготовить образец первого. И когда оно было получено и преобразовано в топливо, устойчивость к нагреву оказалась крайне низкой. Спёрдж Мобли в своей лаборатории синтезировал нитрат другого иона (это была дьявольски сложная работа, занявшая у него недели), также в качестве топлива имевший необычайно плохую устойчивость к нагреву. Ну, что же, так или иначе это была хорошая идея.

В то же самое время мы (и Бюро Аэронавтики) спешили проверить Кавию в двигателе, так что нам нужно было большое количество её соли – и быстро.

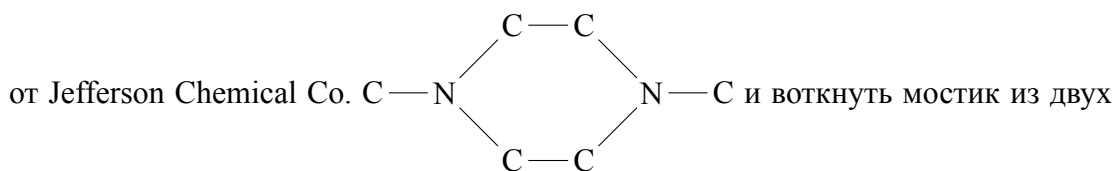
Мне было известно, что парни Джона Гэлла изготовили её путем метилирова-

ния триэтилендиамина $\begin{array}{c} \text{C} - \text{C} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{N} - \text{C} - \text{C} - \text{N} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{C} - \text{C} \end{array}$, и в начале декабря он мне сообщил, что

последний был доставлен Houdry Process Co, будучи использовавшимся для полимеризационного катализа и продававшимся под особенно отталкивающей торговой маркой «Dabco». На тот момент Джон мог снабдить меня солью Кавией по цене примерно 150 долларов за килограмм в 4,5 килограммовых упаковках, я сделал заказ, но не был совершенно убежден, что данная соль не может быть изготовлена более дешёвым способом, чем путём реакции метилйодида (который довольно дорог) и триэтилендиамина, а затем метатезированием на нитрате серебра.

Может быть, я смог бы провести синтез другим путем, и вместо того, чтобы от-

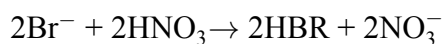
талкиваться от $\begin{array}{c} \text{C} - \text{C} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{N} - \text{C} - \text{C} - \text{N} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{C} - \text{C} \end{array}$ и добавлять углерод к его концам для получения $\begin{array}{c} \text{C} - \text{C} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{C} - \text{N}^+ - \text{C} - \text{C} - \text{N}^+ - \text{C} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{C} - \text{C} \end{array}$, возможно, следует начать с N,N'-диметилпиперазина



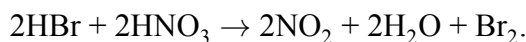
атомов углерода для получения такой же штуки? Я мог бы использовать 1,2-дибромэтан (который значительно дешевле метилйодида) в качестве создателя данной связи и смог бы придти к бромиду, а не к йодиду.

Мы опробовали данный подход, реакция замечательно отработала, дав нам около 95 процентов выхода продукта при первой попытке. Следующей вещью стало нахождение дешёвого пути преобразования бромида в нитрат.

Мне было известно, что достаточно легко окислить ион бромида до чистого брома, но значительно сложнее получить бромат, и я был вполне уверен, что азотная кислота сделает первое, а не второе. Если бы я добавил бромид Кавии к достаточно, скажем 70-процентной, сильной азотной кислоте, реакция должна была быть следующей



и затем

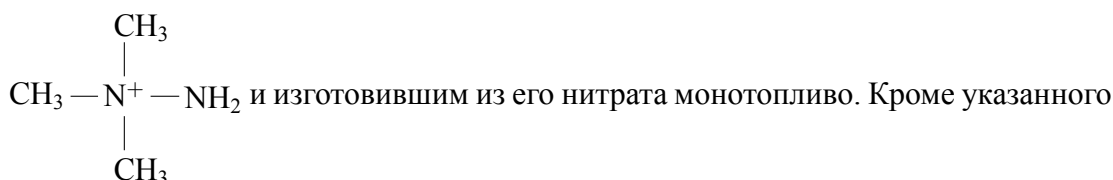


И если прогнать поток воздуха через смесь для выдувания брома и NO_2 , остался бы раствор нитрата Кавии в довольно разбавленной азотной кислоте.

Мы опробовали этот подход, и он сработал. Но было обнаружено, что если мы добавляли соль в кислоту слишком быстро или позволяли расти концентрации брома, то получали осадок трибромида Кавии цвета красного кирпича – соль аниона Br_3^- , и требовались часы продувания прежде чем *он* растворялся и освобождал бром. Я смутно слышал о существовании такого аниона, но это был первый случай, когда я смог увидеть его соль. Так или иначе, мы выпарили нитрат над паровой баней, кристаллизовали его снова из воды (при это образовывались прекрасного вида шестигранные кристаллы) и получили нашу соль Кавии при помощи простого метода, не требовавшего никаких дорогих реагентов.

К этому моменту наступила середина февраля 1959 года, и мы выяснили, что Говард Бост, работавший над своими ди-четвертичными соединениями, независимо пришел к Кавии и, подобно нам, решил, что это будет наилучшим топливом для работы. Так что теперь обе наши программы полностью слились, что было подчеркнуто на симпозиуме, посвященном нитратоаминовым монотопливам, прошедшем под эгидой NARTS первого и второго апреля. Я ещё не встречал настолько единодушного согласия внутри столь мощной группы (из девятнадцати гостей восемнадцать были докторами философии и один пьяным гением), и мы все были убеждены, что будущее принадлежит Кавии, возможно, что с некоторыми структурными изменениями, позволяющим нам получить лучшую точку замерзания.

Ещё одна новая разработка, однако, была представлена доктором Уэйном Барретом из компании W. R. Grace Co, метилировавшим НДМГ для получения иона



и изготовившим из его нитрата монотопливо. Кроме указанного выше триметилового соединения он также представил триэтиловые и трипропиловые эквиваленты и был таким наивным новичком в топливных делах, что даже и не подумал убежать тогда, когда при смешивании им пропиловой соли с кислотой эта штука начала нагреваться и выделять пары NO_2 ! Так или иначе, моя банда немедленно изготовила и исследовала некоторое количество его топлива. Мы узнали об этом в четверг второго апреля, выполнили синтез и очистку, а затем метилирование топлива ко вторнику седьмого, и восьмого числа увидели, как оно снова развалило наше устройство по проверке устойчивости к нагреву (это соединение тихо сидело в нём в течение четырнадцати минут и затем взорвалось – и сильно). Я позвонил Баррету и предупредил об его изобретении, но тот решил всё-таки продолжить действовать и повторил наш тест на устойчивость. Через несколько недель он позвонил мне и отчитался, что его образец продержался семнадцать минут до того, как разнес то место, где он находился, и спросил, не нахожу ли я это в качестве хорошего результата проверки!

В то же самое время мною предпринимались шаги в направлении того, чтобы заинтересовать компании Houdry и Jefferson в производстве соли Кавии. Я позвонил в обе 19 февраля, описывая необходимую мне соль и спрашивая, заинтересованы ли они в поставке сотен килограмм. В Houdry, вероятно, все почувствовали себя на седьмых небесах (это случилось в начале 1959 года, и помните, что холодная война продолжалась, все были в восторге от ракет и космоса, и, судя по всему, убеждены – обманчиво – в наличии в ракетных делах большого количества денег, что можно было заработать). Так или иначе, они перезванивали мне несколько раз, когда я звонил из дома в тот вечер, трубку взяла убиравшаяся у них дама, и на следующий день с их стороны со мной говорил директор по исследованиям из Филадельфии. До обсуждения с ним деталей я сказал ему, что Jefferson Chemical участвовали в торгах тоже и заметил, что, возможно, они смогут изготовить соединение дешевле, чем Houdry.

Реакция Jefferson Chemical не была столь истеричной, но достаточно полной энтузиазма. Я заполучил их директора по исследованиям в Хьюстоне доктора Макклилана, описал ему реакцию диметилпиперазинэтилбромиды – тот не слишком в это верил до тех пор, пока не повторил процесс самостоятельно – и спросил, что он может сделать, также отметив, что, возможно, Houdry сможет выдать лучшую цену по сравнению с ними. Это процедура известна как игра на противоречиях.

Обе компании доставили предварительные образцы для одобрения в течение месяца, и я обнаружил, что Макклилан придумал интересный метод избавления от бромиды. Он окислял холодный бромид Кавии при помощи азотной кислоты и затем продувал оксид этилена через раствор. Тот реагировал как $\text{C}_2\text{H}_4\text{O} + \text{HBr} \rightarrow \text{HOC}_2\text{H}_4\text{Br} + \text{HBr}$, формируя бромогидрин этилена, который просто выдувался из системы. С моей точки зрения это был ловкий трюк.¹⁰

¹⁰Макклилан посетил меня несколько недель спустя, и я спросил, для чего у Jefferson были ис-

Так или иначе, обе компании в конце концов выдали свои предложения и, как я и предполагал, вариант от Jefferson был лучше. Они хотели около тридцати трех долларов за килограмм соли Кавии, в то время как наилучшее, что могло предложить Houdry на тот момент, стоило около ста шестидесяти пяти, хотя их исследователи полагали, что они смогут убедить своих руководителей о снижении до ста десяти. Так что теперь не существовало проблем с поставками, за которые пришлось бы бороться. Говард Бост проделал некоторую работу с соедине-

нием $\text{C}-\text{C}-\text{N}^+-\text{C}-\text{C}-\text{N}^+-\text{C}-\text{C}$, что имело лучшую чем у Кавии точ-

ку замерзания, и Чарли Тэйт позвонил мне 10 июня с некоторыми интересными новостями. По всей видимости, Wyandotte решила забросить свои тринитрометановые монотоплива и заняться семейством аминонитратов. И им были доступны

некоторые смешанные замещенные пиперазины типа $\text{C}-\text{N}-\text{C}-\text{C}-\text{N}-\text{C}$.

Так что Чарли соединил эту молекулу с бромидом этилена и получил соединение

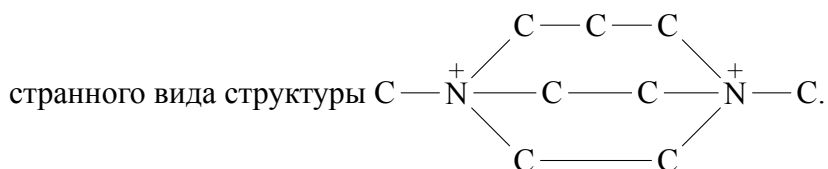
$\text{C}-\text{N}^+-\text{C}-\text{C}-\text{N}^+-\text{C}$. Топливо имело точку замерзания сильно ниже -54° , и её значение карточной прослойки составляло всего три карты. Иными словами,

оно было подобно Кавии, и было названо Кавиа Б (Rocket Branch подумало, что «2-метил-Кавиа» будет уж слишком откровенным именем!).

Компания Wyandotte изготовила другие соединения подобного рода, некоторые с двумя дополнительными метиловыми группами, присоединенными различным образом, но Кавиа Б была простейшей и, поэтому, лучшей, так что для остальных всё так и закончилось ничем. И Спёрдж Мобли самостоятельно обнаружил похожее на пиперазин семичленное соединение с формулой вида

$\text{C}-\text{N}-\text{C}-\text{C}-\text{N}-\text{C}$ и затем добавил к нему перемычку для создания

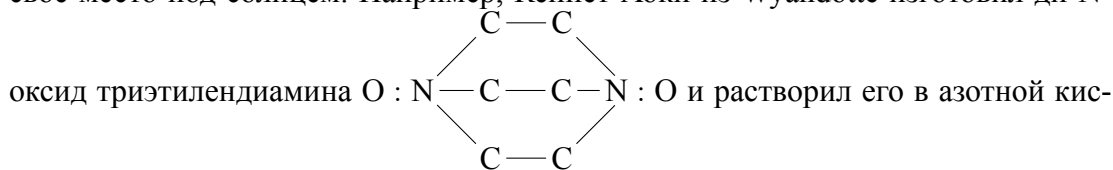
пользованы замещенные пиперазины. Он ответил, растягивая слова настолько же сильно, насколько велики равнины Техаса, «Ну, имеется множество фермеров в наших краях, и они выращивают большое количество свиней. И эти свиньи страдают от кишечных глистов, не жирея как положено. Так что фермеры дают им немного пиперазина в корме, так что глисты засыпают и забывают держаться. И когда они просыпаются, свиней уже и след простыл.»



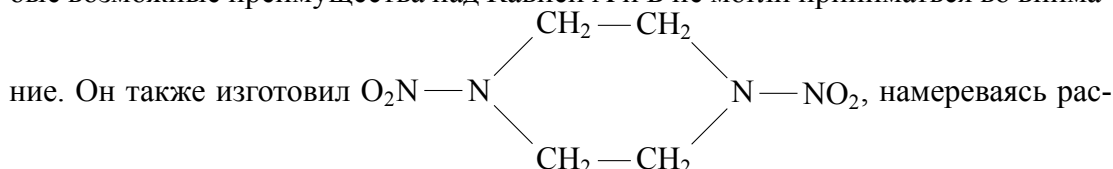
Спёрдж был крайне зол на меня по той причине, что в то время как его создание имело подходящую точку замерзания, я отметил, что оно не обладает преимуществами по сравнению с Кавией Б, а стоит в несколько раз дороже, и поэтому не стал его продвигать.

Кавиа Б выглядела победителем и казалась идеальным монотопливом. И к концу года она была удачно прожжена NARTS, GE, Wyandotte и Hughes Tool, а вскоре и ЛРД. В двигателе её эффективность была очень хороша, выдавая 94 или около того процентов от теоретического импульса в сравнительно небольшой камере. Сгорание оказалось замечательно гладким – лучшим, чем для первоначальной Кавии (теперь именовавшейся Кавией А), что, по всей видимости являлась, *слишком* симметричной и стабильной для того, чтобы предложить процессу сжигания место, за которое можно было бы зацепиться. И не имелось никаких сложностей с поставками, Wyandotte обладала неограниченным количеством пиперазина в качестве исходного материала.

Хотя аминонитраты находились в тот момент времени в центре внимания, другие монотопливные системы активно работали локтями для того, чтобы занять свое место под солнцем. Например, Кеннет Аоки из Wyandotte изготовил ди-N-



лоте. Но он обнаружил, что теплота растворения была слишком высока (возможно, что кислота разлагала оксид и формировала вместо этого нитрат), так что любые возможные преимущества над Кавией А и Б не могли приниматься во внима-



творить это соединение в N_2O_4 или тринитрометане, но выяснил, что оно было настолько нерастворимо в данных окислителях, что это исключало любое его применение.

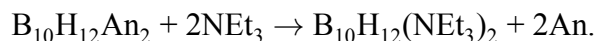
Более интересный подход к разработке монотоплив, выросший из топливной системы В-N, описан в главе, посвященной бору. Как уже отмечалось, битопливная В-N работа преследовалась проблемами со сгоранием, и появилось предположение – или надежда – что все это может быть упрощенно путем объединения бора и азота в одном топливе – или даже в одной молекуле.

Макэлрой и Хуф из Callery Chemical Co. начали работать над тем, что они назвали «Monocals». Они состояли из аддукта, или дополнительного соединения декаборана, и двух или трёх молекул монометилгидразина, всех вместе разбавленных примерно семью молекулами гидразина. Смешивание ММГ и декаборана должно было выполняться в растворе, или же продукт взорвался бы в процессе нагрева. Данные топлива не были особенно одинаковыми и значительно отличались

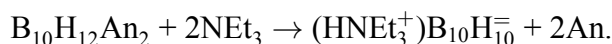
от партии к партии по не вполне понятным причинам, а если точнее – то совсем непонятным. Они были чрезвычайно вязкими, но не казались особенно чувствительными. Wyandotte опробовала их на тестовом стенде в 23-килограммовом двигателе с разочаровывающими результатами, Билл Кадди и его команда в целом не смогли провести пять прогонов, четыре из них или начинались, или завершались детонацией и разрушенным двигателем. Monocals умерли, не будучи оплаканными, в 1960 году.

«Деказин» продержался немногим больше. В июне 1958 группа Х.Ф. Хауторна в Rohm and Haas подготовили $B_{10}H_{12} \cdot 2NH_3$ путем проведения реакции бис(ацетонитрил)декаборана с гидразином. Они надеялись внедрить группу N-N гидразина в молекулу декаборана таким образом, что будет получена замкнутая ячейка структуры карборана, но обнаружили, что их продукт сохранял незамкнутую часть молекулы декаборана без связей N-N. Так или иначе, они растворили один моль данной штуки примерно в 7,5 молях гидразина (они не могли сделать этого с меньшим количеством) и решили, что им удалось получить монотопливо. Оно не было самым простым в мире в плане обращения с ним. Во-первых, захватывался кислород из воздуха. Во-вторых, соединение было довольно чувствительно к нагреву, начиная экзотермически разлагаться с 127° . Его значение карточной прослойки было низким – около 4 карт – но имела место чувствительность к адиабатическому сжатию, располагившаяся для этого теста между нормальным пропилнитратом и нитроглицерином. Но им удалось прожечь данную штуку в течение пары последующих лет, что было сделано Спенсером Кингом из Hughes и Бобом Алертом из Rocketdyne на уровне тяги в 225 килограмм. Никому так и не удалось добиться получения более, чем 75 процентов от теоретической эффективности, и никто не видел пути решения проблемы предотвращения детонации (обычно в области форсунки в процессе работы двигателя) данного монотоплива, если оно пребывало в дурном настроении. Что случалось часто – Алерт выжил в ходе нескольких в самом деле впечатляющих взрывов. И, таким образом, к концу 1960 года все отказались от Деказина как от плохой идеи, и он был аккуратно поставлен на мраморную плиту сразу рядом с местом, занятым последним Monocal-ом.

В 1959 году, однако, Хауторн из Rohm and Haas сделал интересное наблюдение, что привело в другому подходу к проблеме B-N монотоплива. Он заметил, что когда он провел реакцию бис(ацетонитрилового) аддукта декаборана в легком бензине при комнатной температуре с триэтиламином (NEt_3), то она пошла в основном как



Однако, если он осуществлял реакцию при точке кипения (с обратным холодильником) лёгкого бензина, то она протекала почти полностью следующим образом:



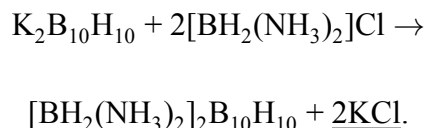
Открытая часть молекулы декаборана была дополнена до замкнутой ячейки с 10-угольной 16-гранной структурой, что позже была названа «пергидродекаборановым ионом». Он имел замечательно стабильную структуру, являлся анионом

очень сильной кислоты – почти такой же сильной, как серная кислота. Не составляло особых сложностей получить гидразиновую соль $(\text{N}_2\text{H}_5)_2\text{B}_{10}\text{H}_{10}$ данной кислоты (несколько простых способов было открыто в течение одного года). Несольватированная соль была чувствительна к удару, но будучи кристаллизованной с одной или двумя молекулами гидразина – было просто получить обе формы – становилась безопасной и простой в обращении. И она могла быть растворена в гидразине для получения топлива.¹¹

К сожалению, вы не могли растворить достаточно этой соли в гидразине для получения нужного числа В атомов, равного числу N атомов, что вы желаете для В-N монотоплива. Луи Рапп из Аэроджет (он незадолго до этого перешел туда из Reaction Motors) примерно в начале 1961 года подумал, что если он заменит один из катионов «Nercat-a» ионами гидразина в соли, то сможет выправить указанный дефицит.

У меня была та же идея в тоже самое время – и я мог продвигаться быстрее, чем он. У меня было меньше оснастки, и я не обращал никакого внимания на контракты в силу их полного отсутствия, начальство редко следило за моей работой, и обычно я мог пробовать делать всё, что хотел, до того момента, как кто-либо из руководителей мог навестить меня и велеть это прекратить. Так что всё понеслось подобно легкому ветерку.

Мобли приготовил для меня несколько грамм хлорида Nercat-a путем совместного перемалывания хлорида аммония и борогидрида лития, как это уже было описано выше. И он также сделал некоторое количество пергидродекаборана калия, затем растворил этих двух в жидком аммиаке и смешал в нужной пропорции. Реакция пошла как



Хлорид калия выпал в осадок и был отфильтрован, аммиаку было позволено испариться, и был получен пергидродекаборан Nercat-a. Убедившись, что вышло так, как и задумано – используя ИК и т.п. для анализа – я велел Мобли добавить один моль данного соединения к шести молям гидразина. Четыре моля гидразина заместили аммиак в катионах, который испарился, и два моля остались в качестве растворителя. Так что, в конце концов, было получено $[\text{BH}_2(\text{N}_2\text{H}_4)_2]_2\text{B}_{10}\text{H}_{10} + 2\text{N}_2\text{H}_4$. Тут имелось два атома бора в катионах и десять в анионе. Также наличествовало восемь атомов азота в катионах и четыре в растворителе. И, наконец, имелось двадцать атомов водорода в катионах, десять в анионах и восемь в растворителе, так что вся смесь балансировалась до $12\text{BN} + 19\text{H}_2$. И, чудесным

¹¹ У меня была блестящая идея, что данная соль также может быть использована для приготовления монотоплива на базе пероксида. Приготовив аммиачную соль пергидродекаборанового иона и поместив несколько миллиграмм его на стеклянную пластинку, я затем капнул концентрированную H_2O_2 рядом с солью и наклонил стекло для получения контакта обеих компонент. Произошла яркая зелено-белая вспышка и самая сильная детонация, что я когда-либо слышал. Стеклянная пластинка была буквальным образом измельчена до мелкого порошка, что положило конец этой замечательной мысли.

образом, данная штука оставалась жидкой при комнатной температуре, не слишком вязкой и не оказалась особенно чувствительной. У нас было только несколько кубических сантиметров её, но она выглядела интересной.

Психологическая награда была получена в августе на конференции, посвящённой монотопливам. Луи Рапп описал то, что он пытался сделать, и затем я получил садистское удовольствие (будучи председателем данной сессии), выдернув из под него ковер путем указания на то, что мы уже сделали и каким образом. Луи Рапп и я были хорошими друзьями, но у меня не слишком часто выпадал шанс дать ему в глаз, и данная возможность была слишком хороша, чтобы её упустить.

Однако это стало наивысшей точкой для данного топлива. Армейское начальство (ВМФ вышел из игры за год до того, и Сухопутные Войска получили контроль над NARTS, что стала именоваться Liquid Rocket Propulsion Laboratory of Picatinny Arsenal) вымолвило слово об отсутствии у Сухопутных Войск интереса к В-Н монотопливам и прекратило разговорчики. Я полагаю, что их решение было правильным. Мой монстр был бы ужасно дорогим в производстве, его плотность, несомненно, не производила впечатление, и не существовало умоуловительной причины верить, что его эффективность будет лучше, чем у других В-Н монотоплив. Данная штука не являлась топливом, применимым на практике. Всё это представление было демонстрацией уловок, предназначенных для того, чтобы показать, что сбалансированное В-Н монотопливо *может* быть создано, что оказалось очень интересным, но стало концом В-Н монотоплив.

Весь указанный интерес к монотопливам привел к формированию в ноябре 1953 года на первой конференции, посвященной данной теме, группы под названием Monopropellant Test Methods Committee, что работала вначале при поддержке Бюро Аэронавтики, затем под эгидой American Rocket Society и Wright Air Development Center соответственно. В ноябре 1958 года область деятельности была расширена на все жидкие топлива, Liquid Propellant Information Agency наследовал её, и агенство до сих пор ещё работает. Я там служил с перерывами в течение нескольких лет.

Первоначальной причиной их образования была врожденная нестабильность монотоплив. *Любое* монотопливо с разумным количеством запасенной энергии может сдетонировать, если вы себя неправильно с ним поведете. Каждый в данных делах имел свои собственные излюбленные методы измерения чувствительности, с которыми он работал. Одной лишь только сложностью было то, что любые два метода непохожи друг на друга, и было попросту невозможно сравнить результаты из одной лаборатории с таковыми из другой. В действительности, оказалось почти невозможным дать определение, скажем, чувствительности к удару. Даже *относительная* чувствительность двух топлив могла зависеть – и часто это делала – от прибора, использованного для проведения измерения. Работой комитета было исследование все задействованных методов, выбор тех, что давали более или менее воспроизводимые результаты, или же просьба людям разработать такие методы, затем стандартизовать их, и в конце концов попытаться убедить непосредственных эксплуатантов *использовать данные методы*. После этого появлялась надежда, что даже если никакие наши тесты или результаты и не имели смысла, по крайней мере мы были бы единодушны в своих мечтах и могли бы разговаривать друг с другом на сближающихся языках и, при наличии удачи, стать

понятыми слушателем.

Первым приняли в июле 1955 года тест с карточной прослойкой, описанный до этого и первоначально разработанный в Waltham Abbey People, а затем упрощенный в NOL, и мы потратили много времени, отыскивая аномальные результаты. Мне помнится, как мы вместе с Джо Херрикес из Bureau of Mines целый день проводили прожиги в двух устройствах для карточных прослоек, пытаясь найти, почему для одного монотоплива результаты отлично согласовывались, а для ещё одного дико отличались. В итоге после замены практически всего в указанных устройствах выяснилось, что затруднение проистекало из чашек с образцами, что в случае Джо были сделаны из алюминия, мои же из железной трубы. Комитет принял стандарт с железной трубой, и мы его опубликовали. Выпуск окончательного совместного отчета иногда сопровождался жаркими спорами, комитет, как можно себе представить, состоял из чрезвычайно в себе уверенных и эмоционально артикулирующих индивидуалистов, и всегда имелось по крайней мере шестеро из нас, что претендовали на собственные лавры в качестве мастера стиля английской прозы. Вот так-то!

Тестом, решение для которого пришлось ждать гораздо дольше, был «сброс груза». Годами народ в взрывных делах сбрасывал грузы на образцы сделанного ими и замерял их чувствительность на основе того, насколько высоко и какой вес вы должны были уронить для срабатывания образца. Мы изучили данную тему и открыли, к нашему испугу, что тестер ЛРД не был в согласии с таковым от Picatinny, который расходился с аппаратурой Hercules, чьи результаты не могли быть сравнены с данными Bureau of American Railroads, что, в свою очередь, противоречили таковым от Bureau of Mines. Далее, никто из них не был хоть сколько-нибудь хорош с жидкостями.


Билл Кадди из Wyandotte в марте 1957 года описал специально разработанное для жидкостей проверяющее устройство, модифицированное Доном Гриффином из Olin Mathieson и окончательно развившееся до того, что известно как ОМ тестер со сбрасываемым грузом¹². В действительности, это было устройство для замера адиабатического нагрева воздушного пузырька над одним сбрасываемым образцом, и данный нагрев этого пузырька и взрывал штуку – или был для этого недостаточен в случае иного развития событий. Это был и есть вполне удовлетворительный инструмент как только вы привыкните к его небольшим причудам. Например, он должен был находиться на *действительно* твёрдом основании если только вы надеялись получить воспроизводимые результаты. Окончательно мы пришли к устройству, прикрученному к, примерно, метровой квадратной армированной плите трехдюймовой толщины, в свою очередь прикрепленную болтами к 180-сантиметровому бетонному кубу, покоившемуся на гранитном основании. Смонтированная таким образом, система работала нормально.

Эл Мид из Air Reduction придумал в 1958 году стандартное устройство для проверки устойчивости к нагреву, ставшее ещё одним полезным инструментом. В нём небольшой образец нагревался с постоянной скоростью, и его температура, при которой этот процесс начинал происходить быстрее, чем у нагревающей ём-

¹² Дон Гриффин, бывший самым свободным духом из всех когда-либо мне известных, затем взял годовой перерыв в области ракетного движения, потратив его на хула-хуповые дела. По его словам, это имело больше смысла.

кости, бралась в качестве критической точки. Мы использовали данный тестер наряду с нашим собственным в течение многих лет, они в самом деле измеряли разные вещи, и мы могли использовать их оба.

Другие тесты были также стандартизованы и опубликованы, но указанные выше являлись наиболее полезными и часто используемыми. Одной из тем, что исследовалась годами, была скорость детонации, критический диаметр для детонации и конструкция детонационной ловушки. Если у вас происходит взрыв монотоплива в двигателе – это один случай, но если данная детонация распространяется обратно (обычно при примерно 7000 метрах в секунду) по топливопроводам, достигает топливного бака, и он взрывается, то вы можете оказаться в действительно серьезной ситуации. В случае достаточно малого диаметра топливопровода детонация не станет распространяться и остановится – ограничивающий диаметр называется «критическим». Он зависит от природы топлива, материала изготовления линии подачи (сталь, алюминий, стекло и т.д.), температуры и, возможно, ещё нескольких обстоятельств (когда мы обнаружили, что детонация в Изольде хорошо распространяется по трубке шириной как у иглы для подкожного впрыскивания, наши волосы встали дыбом, и мы покрылись липким потом).

Начиная примерно с 1958 года и продолжая вплоть до 1962, большое количество работы по предотвращению и остановке детонации выполнялось Rocketdyne, Wyandotte, JPL, BuMines, GE, Hughes, Reaction Motors и NARTS-LRPL, и отважные попытки – некоторые из них были удачны – были предприняты для нахождения способа остановки детонации при её распространении в силу того, что *это* иногда может быть сделано путем помещения детонационной ловушки в топливной линии. Разработка такого рода вещей не является строго научной, а представляет собой часть инженерного искусства, и различные конструкции это показывают. Одна ранняя ловушка состояла просто из петли в линии подачи топлива – вроде такой: . Когда детонация быстро распространяется по этой линии, разрушая трубопроводы по мере прохождения, она должна будет отсечь ту часть, где идет пересечение, не оставляя для детонации места для продолжения. Это не являлось слишком надёжным, энергия, обрезавшая линию подачи, могла начать ещё один совершенно новый процесс детонации. Боб Алерт проделал очень хорошую работу, помещая секцию Flex-Nose, что представляла собой тефлоновую трубку, усиленную оплеткой из металлической сетки, в свою топливную линию. Детонация должна была попросту оторвать данную ослабленную секцию, отрезав себе дальнейший путь для распространения. И Майк Уолш из нашей группы разработал ловушку, что замечательно работала как с Кавией Б, так и с некоторыми другими монотопливами. Кавиа Б не распространяла детонацию в линии толщиной в четверть дюйма, но делала это в однодюймовом топливопроводе. Так что Майк вставил секцию двухдюймовой трубки длиной примерно в тридцать сантиметров поверх его однодюймовой линии подачи топлива, и заполнил данную секцию цилиндрическим куском пластика, что должен был противостоять топливу достаточно разумное время (полистирин хорошо для этого подходил). И он просверлил шестнадцать четвертьдюймовых отверстий вдоль данной цилиндрической вставки, так что у него была область для потока такого же размера, какую он имел для однодюймовой главной топливной линии. И когда он провел испытание, детонация проникла в ловушку, разрушила примерно одну треть данной

конструкции и после этого остановилась.

Но детонационные ловушки не всегда были окончательным ответом, что мы обнаружили летом 1960 года, когда попробовали прожечь двигатель на Кавии Б тягой примерно в 4,5 тонны. В тот момент у нас не было ловушки Майка, так что мы вставили блок из шестнадцати четвертьдюймовых петлевых ловушек в линию подачи топлива. Ну, с такой комбинацией двигатель взорвался при запуске, и мы так и не выяснили, работали ли те ловушки или нет – ибо не могли найти для этого достаточно сохранившихся фрагментов. Части форсунок просто проскочили данные ловушки, впечатались в бак и взорвали в нём около 90 килограмм топлива (каждый килограмм которого содержал больше энергии, чем два килограмма ТНТ). Мне ещё не приходилось видеть такого разрушения. Стены тестового блока – толщиной примерно в 60 сантиметров – исчезли, и крыша рухнула вниз. Сам по себе двигатель – тяжелая рабочая лошадка из упрочненной меди – улетела на расстояние примерно в 200 метров. И около ста восьмидесяти сантиметров квадратной армированной плиты обрушилось на лес, срезав несколько деревьев под корень, разнеся гранитный валун, подпрыгнув в воздух и отсекая верхушки нескольких деревьев для того, чтобы в конце концов упокоиться примерно на расстоянии в 450 метров от места старта. Лес выглядел так, как будто через него пронеслось панически напуганное стадо диких слонов¹³.

Как можно себе представить, данный инцидент содействовал созданию плохой репутации для монотоплив. Если даже вы и могли безопасно их зажечь – и мы только что видели, что пошло не так с процессом зажигания – то как вы будете их использовать при непосредственной эксплуатации? У вас имеется ракета, установленная на пусковой площадке во время боевых действий; и что случится, если ракету поразит заряд шрапнели? LRPL придумала ответ для этого сценария. Вы храните ваше монотопливо в ракете в двух отсеках: один заполнен обогащенным по горючему топливом, изготовленному с коэффициентом λ вплоть до 2,2 или 2,4, и другой содержит достаточно кислоты для разбавления топлива до $\lambda=1,2$. Прямо перед запуском устройство по типу открывалки для банки внутри ракеты нарезает для открытия барьер, разделяющий две жидкости, вы даете им несколько секунд для смешивания и затем жмете кнопку. Данная идея – она была названа концепцией «быстрого смешивания» – неплохо работала. Мы не могли использовать двухсторонние соединения вроде Кавии А или Б в качестве топлива – доведенные до соотношения 2,4, они получали слишком высокую точку замерзания – так что вначале опробовали «Изобель», что была нитратом диметилдиизопропиламония. Я позвонил в химическую компанию в Ньюарке по поводу изготовления ими для нас 45 или около того килограмм соли и получил заверения их директора по исследовательской работе, что это нельзя было сделать в силу невозможности данного соединения из стерических соображений. Я возразил, что в тот самый

¹³Когда я достиг испытательной зоны после взрыва, один из ракетных механиков прискакал галопом и спросил – «Боже мой, док! Что за черта вы прислали нам в этот раз?». Одним лишь ответом, что я мог дать, было закурить сигарету и заметить – «Сейчас, Джонни, нам в самом деле нужно принять мартини!» Что же окончательно довело меня, так это замечание офицера из Picatinny после осмотра разрушений. Это случилось незадолго до того, как NARTS должна была быть «отделена от государства» и передана под контроль Сухопутных Войск, и данный тип (метафорически) потёр свой нос и заметил в никуда «Теперь я знаю, что ВМФ имеет в виду под 'отделением'». Мне хотелось его убить.

момент смотрел на бутылку с данной солью, стоявшей на моем столе прямо напротив меня, но не смог его убедить. Изобель, однако, не вполне удовлетворяла ограничениям на точку замерзания, так что мы сместились к Изобели Е и F, диэтилпропиловой и этилтрипропиловой соли соответственно, что подходили под этот критерий. Данные соли не вполне обладали желаемой мной устойчивостью к нагреву (обычно чем выше λ , тем хуже стабильность), так что в конце концов я придумал Изобель Z, бывшей нитратом диэтилдиизопропиламмония, что получилась невообразимо лучше (если данный тип из Ньюарка думал, что Изобель была невозможна, я не могу и представить себе, что бы он решил по поводу Изобели Z! Тут в самом деле нет никаких следов стерических барьеров в ионе, но это была ситуация на грани. Ни одного атома углерода не может быть засунуто в пространство вокруг азота). LRPL опробовали обогащенные по горючему Изобели при 2,4 или около того в качестве низкоэнергетических монотоплив для привода ВСУ и тому подобного и обнаружили, что они очень хорошо работали в указанной роли. Данное направление было довольно хорошо проработано к 1962 году.

Дэйв Гарднер из Pennsalt не ожидал никаких проблем с детонацией, когда он начал работу в мае 1958 года. Что от него хотели ВВС, так это низкоэнергетическое монотопливо для ВСУ с такой устойчивостью к нагреву, что оно сохранялось бы при 200-300°C, и Дейв, что было вполне естественно, осознал, что низкоэнергетическое соединение с такого рода стабильностью не собиралось создавать для него много затруднений. Он работал примерно три года над указанной темой – Sunstrand Machine Too имела дело с двигательной частью – начав с чрезвычайно стабильных смесей – и отсюда низкоэнергетических топлив – в различных азотных окислителях. Его топлива иногда были солями: тетраметиламмониевой солью серной, фторосульфоновой или трифторометансульфонрвой кислот, или пиридинсульфатом. Иногда он использовал саму по себе метан- или этансульфоновую кислоту в качестве топлива, или трифторэтансульфокислоту $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{SO}_3\text{H}$. Его окислители были или дигидратами хлорной кислоты, или смесями нитрозилпиросульфата и серной кислот, иногда с добавкой азотной кислоты. Эффективность – за которой он не гнался – была, естественно, низкой, но у него на руках имелось замечательно устойчивое к нагреву топливо.

Немного спустя, будучи впечатленным замечательной стабильностью группы $-\text{CF}(\text{NO}_2)_2$, он синтезировал монотопливо $\text{CH}_3\text{CF}(\text{NO}_2)_2$, названную им «Дафни» (я так и не узнал, что это имя означало – или ознаменовывало). Эффективность не была в особенности впечатляющей – связка C-F чрезвычайно крепка – но данный материал оказался устойчивым практически ко всему на свете. Но она, увы, также оказалась женщиной с сердцем, склонным к измене, и когда это случилось, уничтожила большую часть испытательного блока.

Случайно, по ходу своей работы с монотопливами, Дейв создал путем фторирования калиевой соли нитроформа $\text{KC}(\text{NO}_2)_3$ и похожих соединений пару довольно интересных окислителей с высокой плотностью. Это были $\text{F}-\text{C}(\text{NO}_2)_3$,

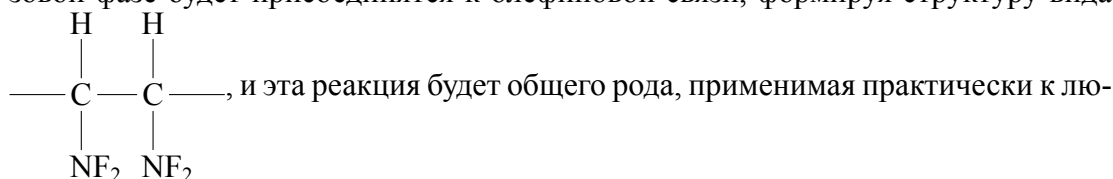
названный им D-11, и $\text{F}-\text{C}(\text{NO}_2)_2-\text{C}(\text{NO}_2)_2-\text{F}$, получивший код D-112. Дейв измерил их теплоту образования путем реакции с монооксидом углерода в баллонном

калориметре, и когда он доложил свои результаты, то настаивал на моем включении в качестве соавтора работы (кем я не был) по причине того, что я первым опробовал реакцию с тетранитрометаном и предположил, что для него это будет хорошим способом разобраться в термохимии сильноокисляющих соединений. Данные окислители, к сожалению, появились как раз в тот момент, чтобы оказаться устаревшими по сравнению с ClF_5 .

Одна из самых странных и определённо самая пугающая глава в истории топлива имела свое начало в двух различных, но почти одновременных событиях. Прежде всего, Advanced Research Projects Administration (ARPA) инициировала «Project Principia» в начале июня 1958 года. Идея состояла в привлечении некоторых больших химических компаний к делу разработки усовершенствованных твёрдых топлив. Описание гласило – «Для получения преимущества их свежего взгляда». American Cyanamid, Dow Chemical, Esso R and D, Minnesota Mining and Minerals (3M) и Imperial Chemical Industries были теми, кого пригласили принять участие.

Старожилы топливной индустрии – Reaction Motors, Аэроджет, Rocketdyne – само собой, подняли волну возмущения. В действительности, они громко кричали на всех углах – «Эти новички могут иметь всё это замечательное оборудование и могут быть круты в теории молекулярных орбит и пи-связей, но они не ознакомились с топливом в ходе набеге за дамскими бельем¹⁴, и всё, что вы получите, так это множество дорогих и бесполезных химических диковинок. С другой стороны, мы занимались топливами на протяжении многих лет и знаем, что они должны делать, и сами по себе не являемся такими уж плохими химиками, так что просто дайте нам такое же замечательное оборудование, и мы сделаем всё то же самое, что и они, но только лучше!» Но их протесты были проигнорированы слушателями, и «Principia» начала свой ход (в конце концов профессионалы в топливной области оказались довольно хорошими пророками).

Вторым событием был анонс У.Д. Нидерзаузером из Rohm and Haas на топливной конференции в конце сентября того факта, что N_2F_4 в ходе реакции в газовой фазе будет присоединяться к олефиновой связи, формируя структуру вида



бому олефину. Он также анонсировал, что HNF_2 может быть подготовлен путем реакции N_2F_4 с AsH_3 .

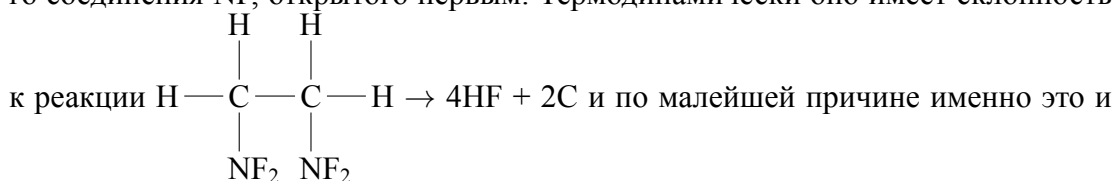
Так что все компании, имевшие отношение к Principia, начали реакции N_2F_4 с различными олефинами для того, чтобы посмотреть, что при этом произойдет (что часто при этом случалось, так это взрыв реактора). Rohm and Haas, разумеется, делали такого рода штуки, и к началу 1959 года как Reaction Motors, так и Джек Гулд из Stauffer забросили исследовавшиеся ими монотопливные системы и присоединились к новой области химии «N-F», Callery Chemical Co. быстро проделала тоже самое. Так что вскоре было по крайней мере девять организаций,

¹⁴Прим. перев. Судя по всему, автор ссылается на эпидемию воровства данного предмета туалета, охватившего общежития американских высших учебных заведений в 50-ых и начале 60-ых.

вовлеченный в исследования подобного рода.

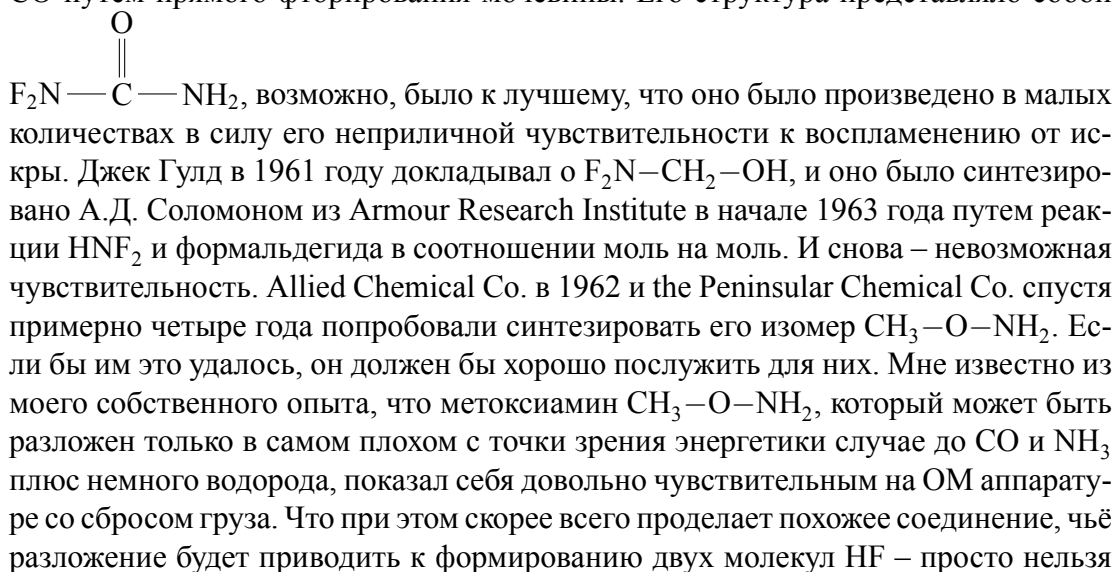
Несколько затруднений имели место на пути марша науки и прогресса программы твёрдого ракетного топлива. Первым стало то, что практически не было открыто новых твёрдых соединений. Большинство представляло собой жидкости, причем довольно летучие. ARPA покорилося судьбе и жизненным фактам и в ноябре 1960 года переписала контракты с включением работы над жидкостями. Второе препятствие не могло быть, к сожалению, обойдено путем записи на куске бумаги.

Практически каждое обнаруженное соединение оказалось непристойно чувствительным и сильно взрывоопасным. Возьмем, к примеру, случай простейшего соединения NF, открытого первым. Термодинамически оно имеет склонность



к реакции и по малейшей причине именно это и проделывает. И формирование четырех молекул HF выделяет достаточно энергии для того, чтобы полученный взрыв выглядел на самом деле интересным. Данные штуки были чувствительны к удару, многие из них неустойчивы к нагреву, и некоторые так реагировали на искры, что их опасно было проливать. Когда вы пробовали проделать это, образовавшихся небольших статических разрядов часто было достаточно для начала детонации. Единственным путем уменьшения их чувствительности было, по всей видимости, изготовление соединения с большой молекулой и малым числом групп NF₂, что не было хорошо для запасенной энергии.

Ещё одним обстоятельством, неудачным для эффективности их (перспективных и, в итоге, возможных) топлив, был тот факт, что при разложении они выделяли значительное количество свободного углерода, который, как уже объяснялось, плохо влияет на эффективность. Очевидным решением было добавление достаточного количества кислорода к молекуле для дожигания углерода до CO. Dow весной 1960 года синтезировал такое соединение, сбалансированное до CO путём прямого фторирования мочевины. Его структура представляло собой



себе и представить.

Esso синтезировала несколько нитратных и нитроаминовых производных соединений NF, в числе которых $\text{O}_3\text{N}-\text{CH}_2-\text{C}(\text{NF}_2)_2-\text{CH}_2-\text{NO}_3$, описанное пер-

вым в 1962 году, было вполне типичным. Некоторые составляющие этого ряда были твёрдыми, а не жидкими, но все были до невозможности чувствительны. Данное соединение, однако, является интересным по причине наличия двух групп NF_2 у одного и того же атома углерода. Эта структура стала возможной благодаря реакции, открытой людьми Rohm and Haas в 1960-1961 годах. Если для HNF_2 проводится реакция с альдегидом или кетоном в концентрированной серной кислоте,

то она идет как $2 \text{HNF}_2 + \text{R}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{R} \rightarrow \text{R}-\text{C}(\text{NF}_2)_2-\text{R} + \text{H}_2\text{O}$, и вам остается две

группы NF_2 на одном и том же атоме углерода. Данная реакция вполне общего рода, и было синтезировано широкое разнообразие «геминальных» дифтороаминовых соединений. Они были столь же чувствительны, как и «вицинальные» или

по типу $\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ | & | \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ | & | \\ \text{NF}_2 & \text{NF}_2 \end{array}$.

Ещё одним способом добавления кислорода в монотопливо было смешивание соединения NF с кислородным окислителем. Джек Гулд (Stauffer) придумал в 1961 году варево, названное им «Гиеной», что состояло из NF (обычно в виде $\text{F}_2\text{NC}_2\text{H}_4\text{NF}_2$), растворенного в азотной кислоте. Дж.П. Черенко из Callery приготовил похожие смеси (названные на тот момент «Циклопами»), но он иногда использовал N_2O_4 и тетранитрометан вместо кислоты, и иногда стабилизировал (как он надеялся) топливо путем добавления пентана. Гиена и Циклопы оба представляли собой абсолютное бедствие.

Человеком, назначенным для выполнения работ по NF монотопливу или должен был доказать с определенностью, что это было невозможно сделать, стал Уолт Уартон из Army Missile Command в Huntsville, с середины 1961 до конца 1964 года он и Джо Коннаутон храбро и упорно двигались к этой цели. Выбранным им соединением было IBA, или изобутиленовый аддукт N_2F_4 , изготовленный Rohm

and Haas путем реакции $\text{CH}_3-\overset{\text{CH}_2}{\parallel}{\text{C}}-\text{CH}_3 + \text{N}_2\text{F}_4 \rightarrow \text{CH}_3-\overset{\text{CH}_2\text{NF}_2}{\underset{\text{NF}_2}{\text{C}}}-\text{CH}_3$. Если данное

соединение смешано с N_2O_4 (1,5 молекулы второго с одной IBA), то данная смесь становится монотопливом с хорошей плотностью и довольно привлекательной (теоретически) эффективностью – 293 секунды. Другие соединения, содержащие больше групп NF_2 , могли выдавать лучшую эффективность, но идея состояла в том, чтобы в принципе заставить работать *любое* количество NF.

Чистый ИВА был чрезвычайно чувствителен на ОМ оборудовании со сбросом груза, и Уайт очень обрадовался, в самом начале, в связи с открытием того, что добавление очень малого количества N_2O_4 – менее 1 процента – уменьшает эту чувствительность практически до нуля. Но затем он начал изучение скорости сгорания в сжигателе нити жидкости. У него были проблемы с зажиганием – горячий прут не был слишком надежен – и он обнаружил, что скорость горения данного материала сильно зависела от давления в ёмкости (следовые количества хлорного железа должны были уменьшить скорость, и добавка тетрахлорида углерода должна была её увеличить). Далее, он открыл, что этот материал обладал достойной сожаления склонностью к детонации в ёмкости или двигателе, что детонационная ловушка из стеклянной трубки не были слишком полезна, и его заставило немного задуматься наличие того факта, что критический диаметр для распространения детонации был меньше 0,25 миллиметра – менее 0,01 дюйма.

Большая часть ранней работы была выполнена с «Т»-двигателем, состоявшим чуть более чем из форсунки и камеры без сопла, и такими точками наблюдения, что процесс зажигания мог записываться с помощью высокоскоростной камеры. Они опробовали запал из ClF_3 для зажигания и вместо этого получили детонацию. В конце концов, они остановились на запале из пентахлориде сурьмы – из всех возможных вариантов – что давала гладкий и надежный запуск. К этому времени они работали с «одноразовым» двигателем без сопла и с низким давлением около двух атмосфер в камере сгорания, и смешивали ИВА и N_2O_4 удалённо прямо на испытательном стенде. Было очень удачно, что они работали таким образом, ибо 150 кубических сантиметров смеси сдетонировало во время теста и разрушило установку.

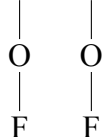
Зимой 1962-1963 года они послали образец ИВА (растворенного в ацетоне, что могло позволить перемещать его более или менее безопасно) в LRPL для проверки с карточной прослойкой. Мы аккуратно выпарили ацетон и провели тест (смешивание ИВА и N_2O_4 было рискованным предприятием). Чистый ИВА не был особенно чувствителен на карточных прослойках (примерно 10 карт), и материал с 1 процентом N_2O_4 давал примерно такой же результат. Но когда он был смешан для достижения максимальной эффективности – один моль ИВА на 1,5 моля N_2O_4 – чувствительность была более 96 карт. Мы так и не выяснили, насколько больше, и наш интерес к данной теме испарился¹⁵.

¹⁵ Два человека могут управлять аппаратурой для карточной прослойки, а три оператора оптимальны для данной работы. Но когда LRPL осуществлял данную конкретную деятельность (искусственное раздувание штатов в Picatinny было беспредельным), на месте проведения операции находилось около семи человек – два или три инженера и произвольное количество ракетных механиков, одетых (без какой-то особой причины) в устойчивые к кислоте защитные костюмы. Так что для последующих событий имелось много наблюдателей. Орудийная башня старого эсминца, где размещалась наша установка для карточной прослойки, была раздёргана и разломана содержащейся в ней шрапнелью (покрытие на эсминце обычно имеет толщину, что способно защитить только от воды и самых маленьких рыбок). Так что мы установили внутри бронеплиту на расстоянии примерно в четыре сантиметра от основной стенки. И по причине того, что установка не использовалась на протяжении нескольких месяцев, большая колония летучих мышей – да, да, именно их, этих маленьких Дракул – переместилась на зиму в проём. И когда произошел первый выстрел, они все разом начали вылетать наружу с нарушенной сонарной системой, трясая при этом головами и ударяя по своим ушам. Они выбрали одного из ракетных механиков – как это обычно и бывает, чрезвычайно пугливого типа – и решили, что он был причиной данного про-

Эти значения не вдохновляли на дальнейшую работу со смесью ИВА- N_2O_4 . Имели место некоторые разговоры об использовании данной комбинации в качестве двухкомпонентного ракетного топлива, но это выглядело достаточно бессмысленно. Уартон и Конногтон прожгли чистый ИВА как монотопливо на уровне тяги примерно в 113 килограмм, но образовывалось настолько много свободного углерода в выхлопной струе, что они так и не получили более 80 процентов от уже и так довольно низкого удельного импульса. Они пришли, с неохотой, к заключению, что NF монотопливо не имело практического применения и отбросили идею в целом в конце 1964 года.

Как только Уартон начал свою работу над ИВА, произошел один из самых странных эпизодов в истории химии ракетных топлив. А.У. Хоукинс и Р.У. Саммерс из Дюпон пришли к некой идее. Она состояла в том, чтобы взять компьютер и скормить ему все известные энергии связей вместе с программой для вычисления удельного импульса. Машина потом должна была жонглировать структурной формулой до тех пор, пока она не пришла бы к построению монотоплива с удельным импульсом сильно выше 300 секунд. Потом следовало распечатать данный результат и развалиться, обхватив консоль руками и ожидая Нобелевскую премию.

BBC всегда имели больше денег, чем невосприимчивости к рекламе, они купили годовую программу (вероятно, за сумму порядка ста или ста пятидесяти тысяч долларов), в июне 1961 года Хоукинс и Саммерс ударили по кнопке «пуск», и машина начала перемешивать перфокарты IBM. А затем распечатывать структурные формулы, выглядевшие подобно дорожной карте зоны разрушений в силу того, что если нарисованные соединения даже и можно было бы синтезировать, они должны были, и совершенно определенно, мгновенно и сильно детонировать. Наивысшим вкладом данной машины в основание науки было соединение $\text{H}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{N}-\text{N}-\text{H}$, которому она уверенно назначила удельный



импульс в 363,7 секунд, причём с точностью в десятую долю секунды. Потрясенные BBC прекратили программу после года работы, запоздало осознав, что они могли заполучить такую же структуру от любого опытного специалиста в области ракетного топлива (например, меня) в течение получасового обсуждения по полной цене в пять долларов или около того (предназначенных для выпивки, ибо мне было бы страшно даже *нарисовать* такую структурную формулу без, по крайней мере, пяти Мартини, заложенных за воротник).

Программа NF приводила к некоторой интересной, хотя и, в конце концов, бесполезной работе по окислителям. Было очевидно ещё в самом начале, что если вы можете присоединить достаточно групп NF_2 к атому углерода, результатом станет скорее окислитель фторного типа, чем монотопливо. Компания Cyamid в конце 1959 года сделала первый шаг в данном направлении, когда они синтезировали

исшествия. И если вы, уважаемый читатель, не видели нервного ракетного механика, полностью одетого в обезьяний костюм, окруженного девятью тысячами обезумевшими летучими мышами и пытающегося отбиться от них при помощи лопаты, вы в самом деле кое-что пропустили в своей жизни.

ли $\text{F}_2\text{N} - \text{C} = \text{NF}$. Затем 3М весной 1960 года провела синтез «Соединения М»,

$\text{F}_2\text{C}(\text{NF}_2)_2$, путем прямого фторирования циануровой кислоты и несколько позднее таким же образом создала «Соединение R», $\text{FC}(\text{NF}_2)_3$. Dow и 3М в 1960 году обе синтезировали перфторогуанидин, или «PFG» $\text{FN} = \text{C}(\text{NF}_2)_2$, путем реакции фтора, растворенного в азоте, с гуанидином. И, в конце концов, в 1963 году «Соединение Δ» (дельта), или «Т», или «Тетракис» из тетракис(дифторамино)метана $-\text{C}(\text{NF}_2)_4$ было синтезировано Франком, Фиртом и Майерсом в Cyanamid и Золингером в 3М. Для первого был фторирован NH_3 аддукт PFG, второй использовал аддукт HOCN .

Все эти соединения были сложны в получении – только R смог достичь уровня синтеза в килограммовых количествах – и невероятно дороги. Их вычисленная эффективность с подходящими горючими являлась достаточно впечатляющей, но ещё в большей степени это относилось к чувствительности, так что ни с чем из них нельзя было иметь дело. Были сделаны попытки снизить данную чувствительность без удачных результатов. Уартон работал некоторое время над смесью R и N_2O_4 , и Аэроджет опробовали некоторые смеси (названные «Мокси»), сочетавшие R, N_2O_4 и ClO_3F или Δ, N_2F_4 и ClO_3F . Но это было безнадежной затеей, когда окислитель NF оказался разведен в достаточной для безопасности степени, все его преимущества в эффективности стали унесёнными ветром.

Имели место некоторые мысли о том, что структура OF, присоединенная к углероду, должна быть стабильнее, чем таковая для NF_2 , и в 1963 году У.Ч. Соломон из 3М указал путь в данном направлении путем реакции фтора с оксалатами, взвешенными в перфторкеросине в присутствии переходного металла, для получения $\text{F}_2\text{C}(\text{OF}_2)_2$ ¹⁶. Три года спустя группа профессора Кэйди из Университета штата Вашингтон изящно и элегантно синтезировала такое же соединение путём реакции фтора и углекислого газа при комнатной температуре в присутствии фторида цезия. Но чрезвычайная мягкость условий его синтеза показывала, что оно было слишком стабильно для основного использования в качестве окислителя. И, в конце концов, как было отмечено в главе, посвященной галогенам, группа в Allied Chemical провела реакцию ONF_3 с перфторолефином вроде тетрафторэтиленом для получения $\text{CF}_3-\text{CF}_2-\text{ONF}_2$ или одного из его родственников, но группа ONF_2 , присоединенная к тяжелому и замечательным образом стабильному фторуглеродному радикалу не является слишком полезной в ракетных делах.

Так что, в общем, программа NF не привела к сколько-нибудь практически значимым жидким топливам, будучи блестящей в плане некоторой продемонстрированной химии. Записи касательно этого теперь собраны и сохранены в безопасности в форме канонического текста, так что никто уже никогда и ни за что не должен будет рисковать своей шеей снова.

Что же до первоначального проекта Principia: гранулы твердого топлива, содержащие NF_2 , были изготовлены – и прожжены, но им предстоит длинный путь, и если они будут готовы к практическому применению до 1980 года или около того, лично я, например, буду удивлен.

¹⁶Прим. перев. Возможно, имеет место опечатка, из соображений валентности формула должна выглядеть как $\text{F}_2\text{C}(\text{OF})_2$.

И что касается будущего высокоэнергетических монотоплив: боюсь, что это неосуществимо. Мы все работали на протяжении многих лет для взаимного примирения свойств, для которых окончательно и с огорчением сделали заключение о несовместимости – высокой энергетики и стабильности. При всех наших усилиях не нашлось высокоэнергетического монотоплива, доведенного до стадии практического применения. Кавиа Б чуть-чуть этого не достигла, но «чуть-чуть» не считается. Но это была чертовски хорошая попытка!

Глава 12

Высокая плотность и высочайшая глупость

Сама идея гибридной ракеты, что использует твёрдое топливо и жидкий окислитель, является очень старой; в действительности, Оберт попробовал изготовить такую для UFA еще в 1929 году, и БМВ экспериментировала с подобного рода устройствами в течение 1944-45 годов. Конструкции немного отличались, но обычно компоновка состояла из цилиндра с топливом, полностью заполненного за исключением центрального канала, проложенного по всей длине и плотно соединенного с цилиндрической камерой сгорания. Окислитель впрыскивается в верхнюю часть канала и реагирует с топливом по пути прохождения вниз, и продукты сгорания в конце концов вырываются из сопла в нижней части топливного заряда (даже когда он весит почти сто килограмм, это все ещё «заряд»¹).

На первый взгляд, данная идея выглядит привлекательно. Твёрдые топлива, с одной стороны, плотнее жидких, с другой стороны, ракета может приводиться в движение подобно чисто жидкостному устройству, в то время как иметь дело нужно только с одной жидкостью. Из соображений безопасности это выглядит идеально, так как не имеется никакого способа получить контакт топлива и окислителя до того момента, когда вы сами этого пожелаете.

Затем, вскоре после окончания войны, несколько организаций с полной уверенностью начали разработку – и испытания – гибридных ракет и плашмя свалились на свои корпоративные физиономии и опыт Дженерал Электрик (в 1952 году в рамках проекта Гермес) был типичным. Они намеревались использовать зерна полиэтиленового горючего с пероксидом водорода в качестве окислителя, и когда они провели испытания своей ракеты, полученные результаты являлись не просто угнетающими – они были провальными. Сгорание проходило чрезвычайно плохо с замеренным значением C^* , доводившим инженеров до слёз. И когда они пробовали усилить тягу своего двигателя, то отношение окислитель-горючее безумно варьировалось и даже близко не приближалось к оптимуму по производительности (что едва ли было удивительным в силу того, что потребление окислителя зависит от площади контакта с топливным зарядом), причём возня с форсункой и уточнение формы заряда топлива помогали плохо.

¹Прим. перев. В оригинале топливный заряд назван «fuel grain», т.е. топливная частица или зерно топлива.

Инженеры оказались виновны в грехе, к которому имели склонность — начинать свою работу до выполнения исследования. И тут стало пугающе ясно, что *никто* не знал, *как* твёрдое топливо сгорает. Испаряется ли оно и затем сгорает в газообразной фазе? Или реакция проходила в твёрдом состоянии? Или что-то ещё? Имелось множество вопросов, очень мало ответов, и деятельность по гибридам завяла на несколько лет. Только ВМФ в NOTS продолжал над этим работать, пытаясь найти некоторые ответы.

Возрождение произошло в 1959 году, когда Локхид, имея контракт с Сухопутными Войсками, начала работу над гибридами. В 1961 году ARPA пошло широким фронтом в этой области, и к 1963 году имело место по крайней мере семь программ для гибридов.

Я чрезвычайно удивился поведению каждого нового исполнителя, выходившего на сцену, чей шаблон действия был один и тот же. Вначале они заполучали себе компьютер, затем вычисляли эффективность всевозможных жидких окислителей с любым твёрдым топливом, о которых только можно было и подумать. После этого публиковался большой отчет, содержащий все результаты указанных вычислений, и, что не было сюрпризом для любого, кто хоть сколько-нибудь поработал в данной области (мы имели все эти вычисления у себя до этого), все выдавали одинаковые цифры и рекомендовали одни и те же комбинации:

1. Гидрид лития плюс углеводородная (резиновая) связующая компонента;
2. Гидрид лития плюс металлический литий плюс связующая компонента;
3. Гидрид лития плюс порошковый алюминий плюс связующая компонента.

И в качестве окислителей были рекомендованы (не обязательно в одном и том же порядке):

1. Трифторид хлора плюс перхлорилфторид;
2. Указанные выше плюс пентафторид брома;
3. То же, но с N_2F_4 ;
4. Или, в конце концов, и чуть позже, чистый OF_2 .

Всё это заставляло некоторых из нас удивляться, стоили или нет деньги налогоплательщиков всего этого дорогостоящего компьютерного времени.

Rohm and Haas исследовали совершенно другой тип гибридов, что будет продолжать гореть и выдавать тягу даже после прекращения подачи окислителя. Заряд состоит из алюминиевого порошка, перхлората аммония и связующей компоненты из пластизола (пластизол является заливаемой и быстро отверждающейся двухосновной смесью, в основном состоящей из нитроцеллюлозы и нитроглицерина, и он сам по себе твёрдое ракетное топливо). Его продукты сгорания включали большую долю водорода и монооксида углерода, и жидкий окислитель N_2O_4 предназначался для реагирования с ними и увеличения выхода энергии и тяги. NOTS выполнила длинную серию исследований сгораний похожей системы из КДАК и композитного заряда, обогащенного топливом (перхлоратом аммония и

углеводородом или похожим связующим). Также как гибридная система является компромиссом между твердой и жидкой системами, данные и похожие комбинации могут быть рассмотрены в качестве сочетающих свойства гибридов и твердых конфигураций.

Стив Танкел из Reaction Motors исследовал гораздо более эзотерическую систему в 1962–63 годах – обратный гибрид, в котором окислитель находился в заряде, состоящем из перхлората нитрония NO_2ClO_4 или диперхлората гидразина $\text{N}_2\text{H}_6(\text{ClO}_4)_2$ в фторуглеродном (тефлонового типа) связующем. Жидким топливом был гидразин, и порошковый алюминий или бор могли также быть взвешены в топливе или включены в заряд. Идея состояла в том, чтобы позволить фтору во фторуглероде прореагировать с формированием трифторида алюминия или бора, в то время как углерод окислялся бы до CO (другие продукты сгорания зависели бы от конкретного состава заряда, потока топлива или так далее). С одной стороны, перхлорат нитрония оказался по своей природе нестабилен, и Танкел так и не достиг эффективного сгорания фторуглерода и металла. Система попросту была слишком изощренной для того, чтобы нормально работать.

Гораздо более важной в длительной перспективе была одна из работ UTC, что имела контракт ВМФ на исследование основного механизма сгорания в гибриде (что, конечно же, должно было бы быть сделано за, по крайней мере, десять лет до этого, и до того, как куча денег была затрачена на деятельность с гибридами. Но всегда легче получить финансирование на инженерные задачи, чем на фундаментальные исследования, и даже и не спрашивайте меня, почему.).

Большая часть этой работы была сделана с упрощенной моделью гибридного двигателя, состоящей из плоской топливной пластины с окислителем, протекающим через её поверхность, и со всей конструкцией, помещенной в прозрачную камеру так, что исследователи могли видеть происходящее и фотографировать его. Топливом обычно служил полиэтилен или метилметакрилат (плексиглас) и окислителем был кислород или OF_2 . Было выяснено, что окислитель реагирует с топливом только с газовой фазе, и что скорость реакции контролировалась диффузией, в то время как скорость регрессии (потребления) топлива сильно зависела от переноса тепла от производимых горячих газов (что, конечно, не было, строго говоря, верно, когда заряд топлива сам по себе содержал окислитель). Исследователи выяснили, что подходящая конструкция форсунки могла сохранять скорость регрессии постоянной на всей поверхности заряда, но смешивание паров топлива и окислителя было настолько медленным, что дополнительный объем смеси, стекающий вниз по заряду, был обычно необходим для получения разумной эффективности сгорания, значительно снижало преимущество плотности, утверждаемого для гибридных систем. Но они поняли, каким образом нужно строить гибридный двигатель, работающий достаточно эффективно.

Таким образом, хотя вся эта работа с зарядами из гидрида лития и окислителям из трифторида хлора так и не дала ничего конкретного, фундаментальное исследование, выполненное UTC, в конце концов привело к одному гибриднему двигателю, что эксплуатировался и участвовал в полете – в качестве силового привода UTC летающей мишени. Окислителем выступает N_2O_4 и горючим является обогащенный по топливу композитный твердый заряд. Гибридный двигатель мог быть изготовлен и запущен в работу – но гибрид не был ответом на все вопросы,

и его место в спектре реактивного движения является и будет сильно ограниченным.

«Аркогели» стали ещё одним пробным подходом к системе с высокой плотностью. Они были получены в 1956 году в Atlantic Research Co., работавших на ними в течение примерно пяти лет, и являлись смесями, состоявшими из, в основном, измельченного перхлората аммония, алюминия и относительно нелетучего жидкого топлива и носителя вроде дибутилфталата. Они имели консистенцию примерно похожую на зубную пасту и, очевидно, не могли быть направлены в камеру сгорания через обычную форсунку, а должны были быть пропущены сквозь наконечники специального распылителя, позволявшего получить полосу этой пасты для максимального увеличения площади горения. Они хорошо сгорали при, по крайней мере, небольших масштабах, но их высокая плотность была недостаточна для компенсации сложности ужасающей задачи конструирования форсуночной системы, что может быть размещена на летающей ракете, и исследование так ни к чему и не привело.

Всевозможные усилия были приложены в течение конца 50-ых для увеличения плотности топлив, и я отвечал (ненамеренно, но будучи воспринятым серьёзно, чего мною не ожидалось) за одно из самых странных из них. Фил Померантц из BuWeps хотел, чтобы я опробовал в качестве горючего $\text{Hg}(\text{CH}_3)_2$, и я предположил, что оно может быть несколько токсичным и слегка опасным для синтеза и обращения с ним, но он убедил меня, что оно было а) очень легко в получении и б) не опаснее материнского молока. Я колебался, но сказал, что посмотрю, что могу с этим сделать.

Я взглянул на эту штуку и обнаружил, что синтез в самом деле был простым, но имела место чрезвычайная токсичность, и она являлась далеко не безопасной. Так как я уже пострадал от отравления ртутью два раза до этого и ни в коем случае не собирался проделывать это снова, то подумал, что будет блестящей идеей попросить кого-то ещё изготовить для меня данное соединение. Так что я позвонил в Рочестер и спросил у моего контактного лица в Eastman Kodak, смогут ли они приготовить 45 килограмм диметиловой ртути и доставить их в NARTS.

Я услышал испуганный вздох, и затем чрезвычайно сдержанный голос (я мог слышать скрежет зубов в промежутке между словами) дал мне знать, что если бы они были достаточно глупы для синтеза такого количества диметилртути, то смогли бы в ходе этого процесса покрыть непрозрачным слоем каждый квадратный дюйм фотопленки в Рочестере, и что, в любом случае будучи благодарным, Eastman *не* был заинтересован в этом заказе. Трубка была резко брошена, и я уселся для обдумывания ситуации, которая, как казалось, должна была быть мучительным образом переоценена.

Фил желал плотности. Ну, диметиловая ртуть была плотной, всё правильно — $d=3,07$ — но она должна была быть прожжена с КДАК, и при разумном отношении в смеси окончательная плотность топлива должна была стать примерно 2,1 или 2,2 (плотность системы кислота-НДМГ около 1,2). Это не выглядело слишком впечатляюще, и я решил применить метод *reducto ad absurdum*². Почему бы

²Прим. перев. Вероятно, имеет место опечатка в латинской фразе *reductio ad absurdum* — доведение до абсурда, представляющей собой логический приём, которым доказывается несостоятельность какого-нибудь мнения таким образом, что или в нём самом, или же в необходимо из

не использовать самую плотную из известных субстанций, что является жидкой при комнатной температуре – саму ртуть – и не впрыскивать её в камеру сгорания двигателя, работающего на, скажем, кислоте-НДМГ. Ртуть при этом испарится в виде моноатомного газа (с низким C_p , что будет улучшать эффективность) и последует в сопло с продуктами сгорания. *Данная* технология должна будет дать Филу всю ту плотность, что он хотел! Очарованный замечательной красотой этой идеи, я взялся за калькулятор.

Для своих вычислений я использовал монотопливо Кавиа А не только по причине его самой по себе высокой плотности (1,5), но также и в силу бóльшей простоты обращения с двумя жидкостями по сравнению с тремя в случае того крайне маловероятного события, что дело дойдет даже до работы с двигателем. Я вычислил эффективность Кавии А с различными отношениями ртути – вплоть до шестикратного превышения массы основного топлива (было легко добавить ртуть в метод вычисления NQD). Как и ожидалось, удельный импульс беспрестанно упал при добавлении ртути в систему, но плотностный импульс (удельный импульс \times плотность топлива) значительно вырос при пиковом превышении в 50 процентов над чистым монотопливом для соотношения ртуть/топливо примерно 4,8.

Следующим шагом стало применение уравнения ускорения движения $c_b = c \ln(1+\varphi d)$ и подстановка результатов вычислений эффективности. Я проделал это для различных значений φ^3 , отметив на графике процентное увеличение ускорения движения, выданное чистым топливом по отношению к процентному содержанию ртути в (фиксированного объема) баке с топливом. Полученный результат впечатлял, с $\varphi=0,1$ и 27,5 процентами объема бака, заполненного ртутью вместо топлива, объемная плотность составляла 4,9, и ускорение движения было примерно на 31 процент выше, чем для чистого топлива; при $\varphi=0,2$ имело место 20-процентное увеличение с 21 объемными процентами ртути. Для $\varphi=1,0$, с другой стороны, самое лучшее, что вы могли получить, стало 2-процентным увеличением ускорения движения с 5 объёмными процентами ртути. Очевидно, что ракета с низким φ вроде работавшей в направлении воздух-воздух, была тем местом, для которого подходила данная система – если она вообще не была применима во всех случаях.

Я серьёзно и формально описал всё это, дополнил графиками, назвал – без шуток – «Концепция топлива с сверхвысокой плотностью» и отправил в Бюро, ожидая увидеть его возвращенным обратно в течение недели с прицепленным письмом «Вы что, решили пошутить?». Но этого не произошло.

Фил купился.

Он приказал нам, причем незамедлительно, проверить вычисления экспериментально, и в NARTS, напугавшись, были вынуждены заняться работой по прожигу двигателя с вдавливанием ртути в центре Morris County, Нью-Джерси.

Испытания двигателя не были проблемой; затруднение состояло в том факте, что все эти пары ртути в атмосфере не будут хороши для здоровья невинных (предположительно) обитателей округа – так же как и для нас самих. Так что дол-

него вытекающих следствиях обнаруживается противоречие.

³Если вы помните, φ является показателем загрузки – объем топливного бака, поделенный на сухую массу (при полном отсутствии топлива) ракеты. Если есть 10 килограмм сухой массы на литр объема бака, то $\varphi = 1/10$, или 0,1.

жен был быть построен газоочиститель, похожий на длинную трубу, в которой будет испытан двигатель, оборудованный водными распылителями, фильтрами и разнообразными устройствами для конденсирования и сбора ртути в истекающей реактивной струе до того, как этот элемент может оказаться в атмосфере. Мы его построили и были готовы применить, когда ВМФ решил закрыть – «отделить церковь от государства» – NARTS и приказал нам доставить всю ртутную установку в NOTS. Со вздохом облегчения это было выполнено, и им вручили новорождённого малыша. Мы были спасены в последнюю минуту!

В NOTS Дэн Коуч и Д.Г. Найберг подхватили данную работу и к марту 1960 года завершили свои эксперименты. Они использовали двигатель на КДАК-НДМГ тягой около 113 килограмм, и впрыскивали ртуть через кран в стенке камеры. И данная штука *работала*! Они использовали до 31 объемного процента ртути в своих прогонах и обнаружили, что при 20 процентах получали 40 процентов прироста плотностного импульса (я получил 43 при вычислениях). Поскольку они проводили испытания в центре пустыни, им не нужно было волноваться о газоочистителе, и не они не отравили не единой гремучей змеи. Технически, система была полнейшим успехом, практически – снова оказалось необходимо что-то другое.

Более практичным (ну или как полагали некоторые) путем получения систем с высокой плотностью являлось использование металлизированного горючего, в котором был взвешен легкий металл. Как мы уже видели, это была старая идея, берущая начало в, по крайней мере, 1929 году. БМВ в Германии опробовало её примерно в 1944 году без значительного успеха, и Дейв Хорвитц из Reaction Motors провёл длинную серию тестов в 1947-1951 годах, прожигая взвесь измельчённого алюминия в бензине с содержанием металла от 10 до 20 процентов с жидким кислородом. Было трудно получить приличную эффективность процесса, и значительная часть металла не сгорала полностью, а выбрасывалась в неизменном виде из сопла. Конструирование форсунки, бывшей в состоянии иметь дело с суспензией, оказалось непростым, в особенности по причине огромной зависимости вязкости взвеси от температуры, и если смесь оставляли на длительный срок, алюминий показывал сильную склонность к оседанию на дно бака.

Так что, хотя Боинг в 1953 году рассматривал вопрос использования суспензии магния в реактивном горючем и прожег её с БДАК (проект так никогда ни к чему и не привёл), интерес к подобного рода штукам зачах на несколько лет. Что его возобновило в конце 50-ых, так это проблема безопасности.

ВМФ всегда с неохотой устанавливали заполненные жидким топливом ракеты в пусковые установки своих возлюбленных авианосцев, ибо что произойдет, если одна из ракет начнёт протекать и изрыгнет порцию высококоррозионного окислителя или легковоспламеняемого горючего (или даже хуже – оба сразу!) на палубу над установкой? Важным замечанием является, конечно, то, что сложно провести вентиляцию под палубой авианосца, и, более того, на борту корабля нет места для укрытия. Кто-то – теперь никто уже не помнит, кто это был – выдвинул идею, что если топливо стало бы преобразовано в гель – с консистенцией не слишком твердого желатинового десерта – утечка происходила бы чрезвычайно медленно, и данная ситуация была бы управляемой. Так же как и проблема впрыскивания топлива в форме геля, это может быть решено путём изготовления тиксотропного

геля, после чего все, кто был вовлечен, потребовали объяснения *данного* термина.

Тиксотропный гель, или «тиксотроп», является своеобразным чудищем и, будучи предоставленным самому себе, остаётся в форме сравнительно твёрдого желе, и, если его на него аккуратно надавливать, сохраняет сопротивление и течет очень медленно, как будто его вязкость очень высока. Если, однако, к нему приложена *большая* сила, или если он подвергнется сильной встряске, или его пропустят под большим давлением через форсунку, то сопротивление неожиданно снижается так, словно он решил расслабиться и получить удовольствие, вязкость резко падает, и он течёт подобно цивилизованной жидкости. В этом случае тиксотропное топливо будет снижать опасность утечки, в то же время сохраняя возможность быть впрыснутым⁴.

Оказалось, что не было слишком сложным преобразовать большинство обычных топлив в тиксотропы. Пять процентов очень мелко измельченного кремнезёма проделывали это с азотной кислотой, и гидразины обычно могли быть превращены в гели таким же образом или путем добавления небольшого процента некоторых производных целлюлозы. И результаты этого *могли* быть прожжены, хотя заблаговременное заполнение бака было разочаровывающей и доводящей до белого каления работой. Эффективность сгорания оставляла желать лучшего, и мертвый вес кремнезёма естественным образом снижал производительность, но данная система могла быть доведена до более или менее рабочего состояния. Настоящая проблема обнаружилась тогда, когда была сделана попытка превратить в гель галогеновые окислители. Кремнезем, конечно, не мог применяться, так же как и агенты по типу углеводной целлюлозы. В Aero projects попробовали преобразовать в гель смесь ClF_5 и BrF_5 с пиролитической углеродной сажей, и подумали, что решили проблему, в особенности, когда значение карточной прослойки показало ноль карт. Я, однако, испытывал сомнения по поводу всей системы и предупредил Билла Тарпли и Дану Маккинни, что она обладала врожденной нестабильностью, и они искали приключения на свою голову. К сожалению, почти немедленно оказалось, что я был прав. Фред Гаскинс работал с некоторым количеством данного материала в 1959 году, когда тот сдетонировал – и потерял глаз и руку, а также пострадал от ожогов фтором, которые свели бы в могилу большинство людей. Каким-то образом он выжил, но это было концом попытки смешать интергалогены и углеродную сажу. Позже были попытки использовать полностью фторированные субстанции вроде SbF_5 для гелевого агента, но, к сожалению, для выполнения этой работы было необходимо чрезмерно большое её количество.

Несколько лет спустя создание геля показалось решением ещё одной проблемы – взбалтывания топлива в космических носителях. Если по какой-то причине топливо в частично заполненном баке начнет плескаться туда и обратно, центр тяжести ракеты будет сдвигаться непредсказуемым образом, и контроль по направлению и высоте будет утерян. Гелевое топливо, разумеется, не подвержено

⁴Желеобразное, или тиксотропное, топливо гораздо менее огнеопасно в случае пролива по сравнению с обычной жидкостью. Оно испаряется и горит гораздо медленнее и не обладает склонностью к распространению пламени по всей округе. Значительное количество работы было недавно выполнено по применению данного принципа к реактивному горючему в коммерческих авиалайнеров в целях снижения опасности воспламенения при аварии.

этой проблеме, и в 1965 году А.Д. Беарделл из Reaction Motors, тогда исследовавший систему диборан-OF₂ для работы в глубоком космосе, взглянул на задачу преобразования OF₂ в гель. Он нашёл, что ему можно было проделать это с мелко измельчённым LiF, который, конечно же, не будет реагировать с окислителем. Однако, эффективность значительно снижалась, так как для формирования геля были необходимы несколько процентов LiF. Р.Г. Глобус из Аэроджет открыл гораздо более элегантное решение проблемы три года спустя, просто пропустив газообразный ClF₃ через жидкий OF₂. Трифторид хлора мгновенно замерзал до состояния микроскопических кристаллов, которые действовали в качестве гелевого агента. Пять или 6 процентов данной добавки создавали очень хороший гель, и её влияние на эффективность было микроскопическим. Но по тем или иным причинам, ClF₅ не заработал.

Топлива в форме геля возобновили интерес к металлизированным горючим. Многие думали, что путем превращения горючего в гель может стать возможным добавление до 50 или около того процентов алюминия, бора или, возможно, даже бериллия – если только вы когда-либо сможете заполучить в руки достаточно последнего – без отслаивания металла. Вскоре также было открыто, что если ваш металл был достаточно мелко измельчён до размера частиц порядка микрометра, так что ван-дер-ваалсовы силы начинают играть важную роль, то это само по себе будет давать склонность к преобразованию смеси в гель. Поэтому имело место большое увеличение усилий и количества занятых людей по всей стране для начала исследования реологических свойств различных металлических взвесей (при этом единственным агентом для создания геля был металл), гелей и даже эмульсий (которые имеют две жидкие фазы – подобно майонезу – кроме самого металла). Большинство исследователей использовали вискозиметры Ферранти-Ширли, что могут измерить вязкость таких субстанций как функции от скорости сдвига (я всегда путал это имя с «Феррари», что вполне объяснимо не только по причине названия, но так же и в силу схожих цен).

Эти исследователи открыли, что приготовление стабильного геля или взвеси являлось не наукой, а чёрной магией, достигающей надежных результатов только с помощью колдовства, а получение двух партий геля с одинаковой реологией было чудом. Но они упорно продолжали работать, и в начале 60-ых несколько смесей были готовы к огневым испытаниям.

Бор, алюминий и бериллий стали теми металлами, что были исследованы. Компания Reaction Motors придумала взвесь бора в углеводороде, предназначенного для использования в ракете с прямоточным двигателем и трифторидом хлора в качестве окислителя. Идея состояла в максимизации плотности топлива, и так как BF₃ является газом, проблемы сгорания не являлись серьёзными. Большая часть работы, однако, напрямую вела к алюминизированным топливам, и Rocketdyne не позднее 1962 года провела испытания смеси алюминий-гидразин с N₂O₄, содержащей почти 50 процентов алюминия, и назвала её «Alumizine». Данное топливо было разработано для усовершенствованной ракеты Титан II, но, хотя они над этим до сих пор работают, оно так и не стало принятым в непосредственную эксплуатацию. Reaction Motors прожгли эмульсию алюминизированного гидразина-углеводорода с N₂O₄ два года спустя, но она тоже не смогла добиться успеха. И хотя Naval Ordnance Test Station несколько раз удачно провели огневые

испытания своего «Notsgel» (алюминия в смесях гидразина в форме геля), оно до сих пор не нашло применения⁵. Также имелись другие алюминизированные горючие, но ничто из них не готово для непосредственной эксплуатации.

По моему мнению, пройдет много времени до того, как они смогут быть использованы на практике, если это вообще когда-нибудь произойдет, в силу ужасающих проблем. Имеется две их разновидности, возникающие когда вы пробуете хранить топливо и когда пытаетесь провести его прожиг, и сложно сказать, какая из них упорнее сопротивляется решению.

Для предварительно заполненных ракет указан срок хранения в пять лет, и много чего может случиться с металлизированным гелем за указанный срок, в особенности, если температура хранения значительно меняется на протяжении этого времени (что может происходить при хранении ракеты вне помещения), или если она подвергалась воздействию вибрации, что обязательно имеет место при перемещении из точки А в точку Б. Металл всегда имеет склонность к отслаиванию, и эта особенность усиливается при широких изменениях температуры, что сильно и иногда необратимо меняет реологию геля. И вибрации, конечно, создают тенденцию к уменьшению вязкости, в случае тиксотропного геля, разумеется, временную, но достаточно долгую для появления значительного выпадения осадка. Или может иметь место синерезис – особенный порок, которому подвержены гели. Если это произойдет, гель начинает усыхать и выдавливать жидкость из своей структуры, и концом процесса может стать сравнительно малого объема чрезвычайно плотная и жесткая твердая фаза, окруженная чистой жидкостью. Ничего из этих вещей может и не произойти – но, с другой стороны, они могут и случиться – и в настоящее время наши знания ещё не развились до того уровня, когда можно гарантировать, что металлизированный гель выдержит без изменений пять лет хранения в климате, чьи условия варьируются от таковых для мыса Барроу⁶ и до пустыни Мохаве.

Большинство рассмотренных гелей и взвесей основывались на гидразине или его смесях, и данный факт был причиной ещё одной – и очень специфической – проблемы. Баки ракет обычно изготовлены из очень чистого алюминия, но всегда имеются некоторые загрязнения, и часть из них с высокой вероятностью являются переходными металлами вроде железа, катализирующих разложение гидразина. Однако, если концентрация каталитических металлов составляет только несколько частей на миллион, очень небольшое количество воздействующих атомов будут находиться на самой поверхности бака, где они и станут создавать неприятности, в итоге разложение с выходом газа будет пренебрежимо малым. Но если гидразин залит с очень мелко измельченным алюминием, объёмное соотношение поверхности металла увеличится на много порядков так же, как и количество каталитических атомов, входящих в контакт с гидразином. При таких обстоятельствах разложение невероятно ускоряется, и даже если оно недостаточно для серьёзного изменения состава горючего за разумный период времени, сопутствующее выде-

⁵Одна из их гидразиновых смесей была комбинацией 3:1 монометилгидразина и дигидразиноэтилена, имевшей точку замерзания -61° , и вязкость ДГЭ улучшило стабильность геля. Это одно из немногих топливных применений, что ДГЭ нашёл к данному моменту.

⁶Прим. перев. Мыс Барроу – крайняя северная точка США и самая северная часть западной половины Американского материка.

ление газа могут привести к серьёзным и сбивающим с толку результатам. Из-за газа, который не может покинуть гель, последний, вслед за всеми этими событиями, вспучивается в точности как сырное суфле, после чего попробуйте прогнать *это* через форсунку!

Если всё же предположить, что с проблемами хранения удалось каким-то образом справиться, нам ещё остаются сложности при работе системы, первой из которых является подача топлива из бака. Если металлизированный гель находится под давлением – то есть происходит сильный наддув газа в бак для вытеснения горючего – имеет место некоторого рода туннельный процесс. Данный газ попросту продувает дыру при прохождении через гель к месту выхода и оставляет большую часть горючего нетронутым и спокойно сидящим по стенкам бака вместо вытекания, как это предполагается, через линии подачи компоненты к двигателю. Горючее должно быть полностью ограничено, например, гибкой оболочкой (к которой и применяется выталкивающее давление), или большая часть его попросту не покинет бак. Как только горючее оказывается вне бака, скорость, с которой оно течет через топливопровод и форсунку в двигателе, сильно зависят от вязкости, и данное свойство металлизированного геля безумно меняется в зависимости от температуры. Так как вязкость окислителя даже и близко так себя не ведёт, результатом становится тот факт, что соотношение в смеси, если вы прожигаете её в двигателе при -40° , будет с высокой вероятностью отличаться от такового в ходе испытания при $+25^{\circ}$ – и это определенно не будет тем, что вам необходимо.

После этого, если ваше горючее попадает в двигатель (я не буду вдаваться в подробности проблемы разработки форсунки, которая станет подходящим образом распылять гель), ещё имеется задача сжигания алюминия. До тех пор, пока температура в камере сгорания не сильно выше точки плавления оксида алюминия (что составляет около 2050°), или не выше гораздо более высокой и предпочтительной температуры, при которой оксид разлагается, частицы алюминия попросту покрываются слоем твердой или жидкой окиси и не сгорают полностью. При сжигании с N_2O_4 температура в камере лишь слегка выше необходимой для подходящего сгорания алюминизированного геля, и чрезвычайно вероятно, что данный процесс с азотной кислотой будет проходить на грани с температурой в камере сгорания, недостаточной для полного сжигания металла (с галогеновым окислителем вроде ClF_3 данная частная проблема не возникает, так как при температурах, о которых мы говорим, AlF_3 является газом). И, естественно, плотные облака твёрдого Al_2O_3 , возникшие в результате сгорания алюминиевого геля, оставляют очень подозрительный след выхлопных газов.

Имеется последняя проблема, стоящая упоминания – последняя в силу того, что когда она возникает, двигатель вырубается. Тепло от горячего двигателя проникает обратно в форсунку, и гель в её отверстии создает нечто, напоминающее железобетон, который должен быть высверлен перед тем, как станет возможным следующий прожиг. Так что перезапуски находятся вне рамок обсуждения.

Проблемы с гелями на основе бериллия точно такие же, как и в случае алюминия, если даже не бóльшие, и имеются одна или две дополнительные сложности, специфические для этого случая. Присутствующий в истекающей струе BeO , конечно же, страшно ядовит, вызывая нечто, напоминающее быстро развивающийся

силикоз, но большинство наиболее сложных проблем возникает в процессе сгорания. Оксид бериллия плавится при значительно более высокой температуре, чем оксид алюминия, и не испаряется до тех пор, пока температура не приближается к 4000° , так что сжигание этого металла даже сложнее такового для алюминия. Розенберг из Аэроджет провел прожиг взвеси бериллий-гидразин («Beryllizine») с пероксидом водорода в 1965 году и получил С*-эффективность около 70 процентов, что означало, что бериллий *не* сгорел, в Рокетдайн получили такой же результат с данной комбинацией. Когда Розенберг использовал N_2O_4 в качестве своего окислителя, его С*-эффективность составляла примерно 85 процентов, показывая, что *некоторое* количество металла было сожжено. Полученная им эффективность выглядела в особенности плохо при том, что должно было быть оптимальным соотношением в смеси. Были разработаны разного рода уловки вроде напыления хрома на измельчённый бериллий для улучшения сгорания, но это не улучшило ситуацию приемлемым образом.

Гидрид алюминия являлся соединением, вызвавшим шквал интереса в начале 60-ых, и он был давно известен, но не в качестве чистого и относительно незагрязненного AlH_3 в силу того, что всегда готовился, будучи растворённым в эфире, который не мог быть удален без разложения гидрида. Однако, Dow Chemical и Metal Hydrides в конце 1959 и в начале 1960 года предложили методы его получения без использования эфира, и Olin Mathieson вскоре внес важный вклад в методы синтеза. Предполагалось применением этого гидрида в качестве ингредиента твердых топлив, но жидкостники пробовали использовать его и в гелях. Он не был достаточно стабильным, но реагировал с гидразинами, выделяя водород в ходе процесса, так что данная идея было быстро заброшена.

Гидрид бериллия BeH_2 оказался более жизнестойким. Он был известен с 1951 года, но снова в неочищенной форме, однако, в 1962 году Дж.Э. Коатс и И. Глокин из Ethyl Corporation сумели приготовить его в довольно чистом (около 90 процентов) состоянии. Назначением тоже являлось использование в твердом топливе, и ему была дана кличка «Beape» (произносимая как «бини») из соображений секретности. Но с кодовым ли именем или нет, но секрет быстро перестал быть таковым. Я находился в офисе Дика Холтцмана в Пентагоне, когда зашел помощник с последним выпуском *Missiles and Rockets*, и там был BeH_2 на всю страницу. Оказалось, что конгрессмен, желавший показать свои познания, допустил утечку информации и рассказал репортеру всё, что ему было известно. Мне приходилось слышать – и использовать – кое-какие крепкие словечки, но замечания Холтцмана были наивысшей точкой в истории применения устных выражений.

Естественно, жидкостники должны были посмотреть, может ли BeH_2 использоваться в геле. Он оказался гораздо стабильнее по сравнению с гидратом алюминия, в особенности, когда находился в аморфном, а не в кристаллическом состоянии, и, согласно отчету Рокетдайн, очень слабо реагировал даже с водой. Техасо, Аэроджет и Рокетдайн исследовали его в монометилгидразиновом геле в период между 1963 и 1967 годами. Аэроджет утверждала стабильность смеси, но гель Рокетдайн, имевший некоторое количество чистого гидразина в своем составе, показал синдром суфле. Его стабильность на протяжении длительного времени вызывала сильные сомнения; определенно, он был термодинамически неустойчив.

Для жидкостей, не имеющих в своем составе активных атомов водорода, ситуация представляется иной. Грелеки из Reaction Motors в 1966 году изготовил 55-процентную взвесь BeH_2 в додекане и прожег ее с пероксидом водорода, получив хорошее сгорание и высокую C^* -эффективность. В том же году Ethyl Corporation сделала, по всей видимости, стабильную взвесь данного материала с пентабораном, и Гандерглори в Рокетдайн исследовал смеси гидрида со его бериллиевыми полужидкостями.

Однако даже если они и являются стабильными – и не из всех «уездов» об этом было слышно – гели и взвеси BeH_2 не кажутся волной, направленной в будущее. Токсичность выхлопа и высокая цена топлива показывает невозможность их применения в случае тактических ракет, и для них не видится никакой другой роли, которая не может быть лучше выполнена чем-то ещё.

Довольно отдаленной концепцией даже для области гелей, взвесей и монотоплив является гетерогенное монотопливо – твёрдое топливо, взвешенное или размещённое в форме геля в жидком окислителе. Midwest Research Institute придумал первое из них в 1958 году, разведя измельченный полиэтилен в КДАК. К сожалению, его чувствительность составляла более 120 карт, и оно было неустойчиво к нагреву для начала маршировки, так что всё было срочно прекращено до того момента, как кто-то пострадал бы. Спустя примерно пять лет Reaction Motors представила похожую смесь с карбидом бора B_4C , разведенного в особо плотной КДАК, содержащей около 40 процентов N_2O_4 . Эта смесь была нечувствительна к тесту с карточной прослойкой, но не обладала устойчивостью к нагреву и также должна была быть выброшена в мусор. В 1965 году они попробовали смешать карбид бора с ClF_5 (!) и обнаружили, что тут, по всей видимости, имела место стабильность при 65° , хотя в самом начале при смешивании двух этих соединений проходили некоторые реакции. Тем не менее, и, судя по всему, помня, что случилось с Фредом Гаскинсом, они не стали продолжать свои эксперименты. Также в течение нескольких лет небольшая организация в Сиэтле Rocket Research Co. на промышленной основе привлекала внимание к «Мопех», которое было смесью измельченного алюминия, гидразина, нитрата гидразина и воды. Они, будучи невежественными или незнакомыми с работой с гидразином и нитратом гидразина за двадцать лет до этого в NOTS, утверждали, что внесли свой исключительный и оригинальный вклад в ракетной области. Недавно они экспериментировали с бериллием вместо алюминия. Эффективность сгорания с данными топливами, в особенности на основе бериллия, обязательно будет плохой ввиду сравнительно низкой температуры в камере сгорания. Рокетдайн в 1966 году проделала некоторую работу с похожими бериллиевыми смесями без особого успеха. Данные гетерогенные монотоплива могут быть рассмотрены только в качестве отклонения от основного пути разработки топлива и с крайне малой вероятностью приведут к чему-либо полезному. Практически всё, что этим доказывается, так это желание ракетчиков опробовать *что угодно*, и неважно, насколько неосуществимое, если только они могут обжужить НАСА или одну из служб в направлении оплаты данных работ.

Что может служить объяснением работы, проведенной с «Tribrid» (самая большая этимологическая чудовищность из когда-то имевших место!). Это были топливные системы, вовлекавшие три компонента, и название отчасти происходит от

«гибрид», иногда использовался термин «триотпливо». Вычисления эффективности, сделанные в начале 60-ых, показывали, что для применений в космосе имелось две топливные системы, чей удельный импульс превышал таковой у любой другой системы, что можно только и придумать – и превосходил их на впечатляющее значение. Первой была система Be-O-H, в которой бериллий сжигался до BeO при помощи кислорода, а водород предоставлял рабочее тело. К ней начал проявляться значительный интерес в 1963 году или около того, и Atlantic Research и Аэроджет начали программы, разработанные для подтверждения свойства этих систем.

Подход Atlantic Research состоял в расширении гибридной системы. Измельченный бериллий был превращен в твердый заряд с помощью небольшого количества углеводородного наполнителя, система сгорала как гибридная с кислородом, и затем водород подавался в камеру в нижней части заряда (в вариантах расположения некоторая часть его поступала в верхний сегмент с кислородом, и оставшийся водород далее в нижнюю часть). Был необходим, конечно, газоочиститель для удаления BeO из истекающей струи – и полный набор мер предосторожностей во избежание отравления наблюдателей был просто фантастическим. В любом случае, хотя двигатель мог быть и был испытан, эффективность сгорания была чрезвычайно плохой, и система на практике никогда не достигла своего теоретического потенциала.

Д.М. Бэйтли из Аэроджет опробовал ещё один подход, который напоминал обыкновенные двухтопливные компоновки. Его двумя топливами были жидкий водород и взвесь измельченного металлического бериллия в жидком кислороде. Он смог доложить свои результаты к 1966 году, и они не были вдохновляющими. Ему так никогда и не удалось получить более 70 процентов эффективности сгорания, и он преследовался «противопрогарами» своей взвеси Be-O₂ сквозь форсунку. Так что в самом деле удивительно, что он не убится.

В любом случае, он не продолжил свою работу, и поскольку мало что было слышно о системе Be-H-O за последние несколько лет, она, по всей видимости, мертва. Когда к токсичности BeO и цене бериллия добавлены сложности со сгоранием, имеется не особенно много причин продолжать иметь с ней дело.

Система Li-F-H выглядит гораздо более многообещающей и была исследована довольно подробно в Рокетдайн. В данном случае возможны два подхода. Литий имеет низкую для металла точку плавления – 179° – так что можно впрыскивать литий, фтор и водород в двигатель в форме жидкостей в настоящей трёхкомпонентной системе. Или литий может быть взвешен в водороде так, что двигатель станет работать как двухкомпонентная система. Рокетдайн начала исследовать гели Li-H₂ в 1963 году, и три года спустя Билл Тарпли и Дана Маккинни из Technidyne (переименованном Aeroprojects) докладывали о создании геля из жидкого водорода с литием и боргидридом лития. Удовлетворительные и стабильные гели были созданы с 61,1 весовым процентом (17,4 объемных процента) лития или 58,8 весовых процентов (13,3 объемных процента) боргидрида лития. Скорость испарения водорода была снижена в 2 или 3 раза, преобразование горючего в гель устраняло все проблемы с распылением топлива.

Но их работа проводилась только на уровне литровых количеств, и в то же самое время Рокетдайн продвинулось вперед с ещё одним подходом и прожгла

комбинацию в истинно трёхкомпонентном двигателе. Они использовали жидкий литий и жидкий фтор, но при этом газообразный водород вместо жидкого. Я полагаю, ими было принято решение, что одновременное обращение с двумя такими пугающими жидкостями как фтор и литий уже являлось достаточным и не стоило добавлять к их мучения сложности жидкого водорода. Я уже описал некоторые из проблем, связанным с жидким фтором, а жидкий литий обладает своим собственным набором головных болей, вы должны сохранять его в горячем состоянии, или же он замерзнет в топливопроводах. Вы также должны оградить его от контактов с атмосферой, иначе он прорвется в виде яркого пламени, которое практически невозможно погасить. Добавьте к этому тот факт, что жидкий литий крайне коррозионный по отношению в большинство металлов и несовместим ни с чем, что вы бы могли желать использовать в качестве прокладок и герметизирующих материалов (он даже с энтузиазмом атакует тефлон) – и у вас имеется много проблем.

Но каким-то образом команде Рокетдайн (Х.А. Арбит, Р.А. Дикерсон, С.Д. Клапп и Ч.К. Нагаи) удалось их преодолеть и провести свое огневое испытание. Они работали при давлении в камере сгорания в, примерно, 34 атмосферы и с соплом высокой степени расширения (площадь на срезе/площадь критического сечения = 60), сконструированным для применения в космосе. Их главная проблема возникала из-за высокого поверхностного натяжения лития, в разы превосходящего таковое у обычных топлив, что делало сложным разработку форсунки, которая выдавала бы капли лития, достаточно малые для полного сгорания перед покиданием сопла. Как только данная проблема была преодолена, их результаты оказались впечатляющими, и если при использовании только лития и фтора (без водорода) максимальный удельный импульс составил 458 секунд, то когда они применили пропорцию лития и фтора, приводящую к стехиометрическому сгоранию до LiF , и впрыснули водород в количестве вплоть до 30 процентов от массового расхода, то замеры показали 542 секунды – вероятно, наивысшее значение удельного импульса, когда-либо полученное для чего угодно за исключением ядерного двигателя. И температура в камере сгорания составляла только 2200K! Это было эффективностью, за которую стоило биться. Двигатель, сжигающий бериллий, возможно, является безнадежным делом, но система литий-фтор-водород вполне может иметь блестящее будущее.

Глава 13

Что будет дальше

Абсолютный предел эффективности химической ракеты, пусть даже и в космосе, видится где-то ниже 600 секунд. Это разочаровывающая ситуация, и были предложены замечательные возможные методы преодоления данного барьера. Один из них использует свободные радикалы или нестабильные виды молекул в качестве топлив, и применяет их энергию возврата в стабильное состояние для реактивного движения. К примеру, когда два атома водорода соединяются для образования молекулы H_2 , освобождается около 100 килокалорий энергии на двухграммовый моль. Это означает, что смесь 50 на 50 (по весу) одноатомного и обычного водорода будет иметь эффективность около 1000-1100 секунд. То есть, это будет иметь место если вы:

- А) сможете изготовить такой одноатомный водород, смешать его с обычными и
- Б) будете в состоянии предотвращать эту смесь от немедленного превращения в обыкновенный H_2 с катастрофическими последствиями.

На данный момент ни у кого нет и малейшей идеи, как выполнить каждый из указанных пунктов. Такие свободные радикалы, как CH_3 и $OO\dot{F}$ *могут* быть изготовлены и заключены в матрицу, скажем, из замороженного аргона, чья масса настолько велика по сравнению с таковой у захваченных радикалов, что вся идея становится фарсом в отношении применения в реактивном движении. Техасо однажды исследовал данное явление захвата и электронные состояния удержанные фрагментов молекул в течение нескольких лет, но программа в целом, будучи интересной в академическом отношении, должна быть классифицирована как трата денег налогоплательщиков если она декларирована относящейся к реактивному движению. Имеет место колкое замечание, услышанное на одной встрече – «Одними только лишь людьми, кому хоть как-то повезло захватить свободных радикалов, были ФБР».

Так что оказалось, что единственным практически пригодным путем увеличения удельного импульса в приложениях с большой тягой является смещение в сторону ядерной ракеты, которая, к счастью, работает и уверенно находится на пути к состоянию пригодности для непосредственной эксплуатации (ионные и прочие электрические маневровые космические двигатели полезны только в применениях с малой тягой и находятся вне рамок данной книги – и за пределами

моих познаний для их описания). Так что химическая ракета, вероятно, ещё будет с нами какое-то время.

И теперь приводятся мои предположения о том, как жидкие топлива собираются быть использованы в течение нескольких последующих лет и, возможно, до конца столетия, хотя тут я и слишком вытягиваю шею, заглядывая вдаль.

Тактические ракеты малой дальности с радиусом действия до 500 км или близкого значения будут заправляться КДАК-НДМГ с постепенным сдвигом в сторону чего-то вроде ClF_5 и близкого к гидразину горючего. Монотоплива вряд ли станут использоваться для основного применения, и проблемы с гелями и взвесями настолько велики, что едва ли предоставляемые ими преимущества перевесят сложности доведения их до стадии непосредственной эксплуатации.

Для ракет дальнего радиуса действия комбинация N_2O_4 и гидразиновой смеси, применяемая в Титане II, будет продолжать использоваться. Данная пара имеет громкий успех, и если кому-то захочется поставить большую боеголовку на эту зверюгу – лично я не вижу для этого причин – будет гораздо проще просто построить больший Титан, чем разрабатывать новую топливную систему.

Для больших первых ступеней космических носителей мы будем продолжать использование жидкого кислорода и PR-1 или его эквивалента. Они работают и они дешёвы – а Сатурн V потребляет много топлива! Позднее мы *можем* сместиться в сторону водорода в качестве горючего для первой ступени, но это кажется маловероятным. Разработка многоразовых носителей не изменит картину, но в случае создания прямоточного устройства все ставки обнулится.

Для верхних ступеней водородно-кислородная пара двигателя J-2 чрезвычайно удовлетворительна и, по всей вероятности, будет использоваться долгое время. Позднее, по мере возникновения надобности в большей энергии, может иметь место сдвиг для верхней ступени к водороду-фтору и водороду-литу-фтору. Ядерная ракета все это превзойдет.

Для лунных посадочных модулей, сервисных модулей и подобных им – кажется, что N_2O_4 и гидразиновое горючее продолжат применять в течение долгого времени. Мне в голову не приходит никакой пары, что могла бы заменить их в будущем, доступном предвидению.

Зонды в дальнем космосе, работающие при низких температурах, возможно будут использовать метан, этан и диборан в качестве горючих, хотя пропан также вероятен. Окислителями будет OF_2 и, возможно, ONF_3 и NO_2F , в то время как перхлорилфторид ClO_3F должен будет быть полезен в таких далеких полётах, как к Юпитеру.

Я не вижу места для бериллия в реактивном движении так же, как и для N_2F_4 и NF_3 . Перхлорилфторид может, как я уже отмечал, иметь некоторое применение в космосе, как и кислородсодержащие добавки для ClF_5 , что, вероятно, полностью заменят ClF_3 . Пентаборан, декаборан и их производные в случае жидкотопливной реактивной тяги вернутся к своей прежней благородной неизвестности. Пероксид водорода будет продолжать использоваться как монотопливо для контроля ориентации и других приложений с малой тягой. Он, вероятно, не будет задействован для основного применения в реактивном движении.

Это та картина, что я вижу в моём отчасти затуманенном хрустальном шаре. Она может быть неправильной в деталях, но я верю, что в целом она не будет

слишком отличаться от нарисованного двадцать лет спустя от текущего момента. Похоже, что мало чего осталось сделать в химии жидких топлив, и ожидается очень немного важных исследований. Коротко говоря, мы как топливные химики сами довели свою деятельность до завершения, и героическая эпоха закончилась.

Но было много веселья, пока она продолжалась.

Список сокращений

A	«Соединение А», ClF_5 .
A-4	Немецкая баллистическая ракета, использовавшаяся для бомбежек Лондона, также называвшаяся V-2.
ARIB	Aeronautical Research Institute at Braunschweig, Авиационный Исследовательский Институт в Брауншвайге, также известный как Исследовательский Институт Германа Гёринга, секретная немецкая организация, занимавшаяся тестирования авиационной техники и вооружения в ходе второй мировой войны и расположенная в городе Брауншвайг в Северной Германии.
ARPA	Advanced Research Projects Administration, Администрация Передовых Исследовательских Проектов.
ARS	American Rocket Society, Американское Ракетное Общество. Объединенное с Institute of Aeronautical Sciences сформировало American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA.
BECCO	Buffalo Electrochemical Company.
CTF	Chlorine Tri Fluoride, трифторид хлора, ClF_3 .
EAFB	Edwards Air Force Base, Авиабазы «Эдвардс», расположенная в пустыне Мохаве, Калифорния.
EES	Engineering Experiment Station, Аннаполис (ВМФ).
ERDE	Explosives Research and Development Establishment, Waltham Abbey, Англия.
Flox	Смесь жидкого кислорода и фтора. Последующее число, например в Flox 30, обозначает процентное содержание фтора.
FMC	Food Machines and Chemical Company.
GALCIT	Guggenheim Aeronautical Laboratory, California Institute of Technology.
GE	General Electric Company, Дженерал Электрик.
IITRI	Illinois Institute of Technology Research Institute, бывший Armour Research Institute.
JATO	Jet Assisted Take-Off, ракета, ускоряющая перегруженный самолёт и помогающая ему подняться в воздух.
JP	Реактивное горючее по типу керосина. Последующее число, например в JP-4, обозначает конкретную спецификацию.

λ (Лямбда)	Мера кислородного баланса в топливе или комбинации топлив. $\lambda = \frac{4C + H}{2O}$, где C, H и O являются количеством молей углерода, водорода и кислорода в комбинации, и равна коэффициенту сокращения окисляющих валентностей.
LFPL	Lewis Flight Propulsion Laboratory, Кливленд, подразделение NASA-NASA.
LRPL	См. NARTS.
MAF	Смешанное аминовое горючее. Последующее число обозначает тип. Смесь Reaction Motors (см. также RMI).
MHF	Смешанное гидразиное горючее. Последующее число обозначает тип. Смесь Reaction Motors (см. также RMI).
MIT	Massachusetts Institute of Technology, Массачусетский Технологический Институт.
MON	Смешанные оксиды азота, $N_2O_4 + NO$. Последующее число обозначает процентное содержание NO.
NAA	North American Aviation.
NACA	National Advisory Council on Aeronautics, Национальный Консультативный Комитет по Воздухоплаванию, предшественник NASA.
NARTS	Naval Air Rocket Test Station, Lake Denmark, Dover, Нью-Джерси. В 1960 году перешел под контроль Сухопутных Войск и был преобразован в Liquid Rocket Propulsion Laboratory of Picatinny Arsenal, или LRPL.
NASA	National Aeronautical and Space Administration, Национальное Управление по Воздухоплаванию и Исследованию Космического Пространства.
NOL	Naval Ordnance Laboratory, Silver Spring, Мэриленд.
NOTS	Naval Ordnance Test Station, China Lake, Калифорния, часто на неё ссылаются как на Inyokern.
NUOS	Naval Underwater Ordnance Station, бывшая Naval Torpedo Station, Ньюпорт, Род-Айленд.
NYU	New York University, Университет Нью-Йорка.
ONR	Office of Naval Research.
PF	Perchloryl Fluoride, перхлорилфторид, ClO_3F .
RMD	См. RMI.
ROR	Rocket On Rotor, ракета на несущем винте, использовалась для увеличения мощности вертолета.
RMI	Reaction Motors, Inc., позже ставшая RMD, Reaction Motors Division of Thiocal Chemical Co. Окончила свои дни в конце 1969 года.
SFNA	Stable Fuming Nitric Acid, стабильная дымящая азотная кислота (устаревшее).
TRW	Thompson Ramo-Wooldridge Corporation.
UFA	Немецкая кинокомпания в 1920-ых и 1930-ых годах.
USP	United States Pharmacopea.

UTC	United Technology Corporation, подразделение United Airlines.
V-2	Пропагандистское название А-4.
VfR	Verein für Raumschiffahrt, товарищество космических путешествий, немецкое ракетное общество.
Visol	Немецкое ракетное горючее, основанное на виниловых эфирах.
WADC	Wright Air Development Center, Dayton, Огайо; подразделение ВВС.
БДАК	Белая дымящая азотная кислота.
БМВ	Bayerische Motoren Werke AG, Баварские моторные заводы, немецкий производитель автомобилей, мотоциклов, двигателей, а также велосипедов.
БРСД	Баллистическая ракета средней дальности.
ИК	Инфракрасный.
ИКДАК	Ингибированная красная дымящая азотная кислота.
ИБДАК	Ингибированная белая дымящая азотная кислота.
КБАК	Красная дымящая азотная кислота.
ЛРД	Лаборатория Реактивного Движения, Jet Propulsion Laboratory, расположенная в Пасадене и находящаяся под управлением Калтеха (Калифорнийского Технологического института).
МБР	Межконтинентальная баллистическая ракета.
ММГ	Монометилгидразин.
НДМГ	Несимметричный диметилгидразин.
Тонка	Немецкое ракетное горючее, основанное на ксилидине.
ЖК	Жидкий кислород.

Предметный указатель

- A-4, *см.* Немецкая баллистическая ракета (A-4)
- Advanced Research Projects Administration (ARPA), 91, 92, 119, 128, 169, 176
- Project Principia, 168, 173
- Aeronautical Research Institute, Braunschweig (ARIB), 22, 27
- A, *см.* Соединение A
- Абрамсон, Берг, 79, 142, 145
- Ацетилен, 43
- Исследования производных, 39, 42–45, 110, 119, 137
- С жидким водородом, как монотопливо, 149
- С кислород-аммиачной парой, 108
- Ацетонитрил
- В качестве добавки к гидразину, 52, 161
- Декаборан плюс гидразин, в качестве монотоплива, 161
- Плюс тетранитрометан, в качестве монотоплива, 150
- Капица, Пётр, 121
- Кислота(ы), *см. также* конкретные кислоты
- Зажигание и реакция для химических связей, 39
- Немецкая баллистическая ракета (A-4)
- В СССР, 121
- В США, 27, 33
- Дальность, 25, 26
- Конструкция и разработка, 21
- Ограничения, 21, 22
- Предшественники, 18
- Привод турбин, 135
- Топливо, 107, 110
- Соединение A, 91, 92
- Уксусный ангидрид и точка замерзания БДАК, 56

ОБ АВТОРЕ

Джон Д. Кларк присоединился к Naval Air Rocket Test Station в Dover, Нью-Джерси, в 1949 (последняя стала Liquid Rocket Propulsion Laboratory of Picatinny Arsenal в 1960) и вышел на пенсию в 1970 году после почти двадцати одного года, посвященного, в основном, разработке жидкого топлива.

Родом из Аляски, доктор Кларк поступил в Университет Аляски и получил степень бакалавра в Калифорнийском Технологическом Институте, степень магистра в Университете Висконсина и, в 1934 году, степень доктора философии Стэнфордского Университета. Он работал в качестве химика в нескольких отраслях промышленности перед тем, как начал взаимодействовать с NARTS.

Большая часть написанного доктором Кларком была в форме официальных засекреченных отчетов, но он также внес свой вклад в виде научных статей и работ в открытой литературе и, в качестве призвания, создавал рассказы и статьи для журналов, посвященных научной фантастике.