

Веселящий газ на орбите

Ph. D. **В.А.Закиров**,
университет Цинхуа
(Пекин)

Закись азота, она же оксид диазота, оксид азота (I) или оксонитрид азота(I), известная также как веселящий газ, — неорганическое химическое соединение, молекула которого состоит из двух атомов азота и одного атома кислорода (N_2O). Этот бесцветный газ со сладковатым запахом открыл и впервые получил в 1772 году английский священник, химик, философ и общественный деятель Джозеф Пристли. После того как Гемфри Дэви показал, что вдыхание этого газа вызывает беспричинную радость, почти 70 лет в Великобритании устраивали вечеринки с веселящим газом (баллончики для вечеринок можно купить и сейчас). Выяснилось также, что веселящий газ повышает болевой порог, поэтому, начиная с декабря 1844 года, его начали использовать для ингаляционного наркоза.

Сегодня спектр применения закиси азота гораздо шире. Поскольку при ее фазовом переходе из жидкости в газ поглощается много тепла, то ее можно использовать для обезболивания в качестве «заморозки». По физическим свойствам закись азота очень похожа на углекислый газ, поэтому она подходит для приготовления газировки и взбитых сливок в баллончиках. Английские исследователи предлагают также вспенивать закисью азота воздушный шоколад — он, по мнению экспертов, получается особо вкусным. Веселящий газ применяется в технике в качестве окислителя. Например для кратковременного увеличения мощности двига-

теля внутреннего сгорания в гоночных машинах и мотоциклах — в двигатель впрыскивают закись азота, массовая доля кислорода в которой (36,3%) существенно выше, чем в воздухе (23,1%).

Кроме того, уникальные физико-химические свойства закиси азота позволяют ее использовать в ракетных двигателях, а также для охлаждения космических аппаратов. О веселящем газе в космосе и пойдет речь дальше.

Ракетные двигатели

При разложении закиси азота образуются азот и кислород: $N_2O \rightarrow N_2 + \frac{1}{2}O_2$. Это реакция экзотермическая (выделяется около 82 кДж/моль), поэтому ее продукты нагреваются до высоких температур. Горячую смесь можно использовать для вращения турбины или создавать тягу в сопле. В первом случае на основе реакции разложения закиси азота получится газогенератор, а во втором — однокомпонентный ракетный двигатель (рис. 1). Сегодня три типа двигателей, работающих на закиси азота, находятся в разных стадиях разработки. Это однокомпонентный ракетный двигатель (использует один компонент топлива), гибридный и жидкостной ракетные двигатели (используют два компонента).

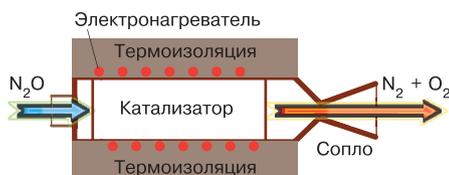
Чтобы началось разложение закиси азота на азот и кислород, необходимо преодолеть барьер энергии активации реакции, для чего закись подогревают

до 800—1000°C либо используют катализатор. Если энергия активации снижена благодаря катализатору (рис. 2), то теоретически реакция может начаться даже при комнатной температуре. Ученые активно занимаются поиском таких соединений, к 1998 году было заявлено более 200 катализаторов. Однако многие из них не подходят по тем или иным причинам — например, спекаются, не выдерживая высоких температур. Для ракетных двигателей химики создали специальные высокотемпературные катализаторы на основе родия (Rh) и иридия (Ir), нанесенные на керамические подложки из оксида алюминия или циркония. Они снижают температуру начала реакции до 200—400°C, а это уже вполне приемлемо для того, чтобы разложение закиси азота можно было использовать в однокомпонентном ракетном двигателе.

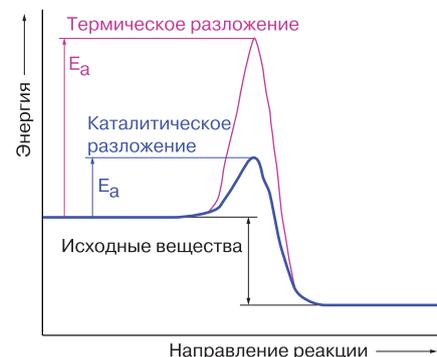
Первый лабораторный прототип такого двигателя автор этой статьи собрал и успешно испытал в 1999 году в Великобритании. С 2002 года исследования были перенесены в Китай. Расчетные тяги лабораторного прототипа (рис. 3) менялись в диапазоне 0,03—0,14 Н, а удельный импульс был равен 156 сек. (насколько это отличается от работающих моделей и принципиально ли это отличие, будет рассказано дальше). Лабораторные модели были также испытаны в России (2006) и в США (2007), и в настоящий момент работы продолжают.

Закись азота можно использовать и в двухкомпонентных двигателях. В них, как ясно из названия, необходимы два компонента реагирующего топлива — обычно это окислитель (им может быть закись азота) и горючее. В окислительных реакциях выделяется много тепла, поэтому удельные импульсы такого типа двигателей выше, чем у однокомпонентных (впрочем, и конструкция их сложнее). Двухкомпонентные двигатели бывают жидкостные (если горючее — жидкость или газ) и гибридные (в случае твердого горючего). История их разработки гораздо более давняя.

Еще перед Второй мировой войной в Германии пытались создать жидкостной двигатель на N_2O и растворе метанола (28% метанола). Назывался он «Hecht»



1
Схема однокомпонентного реактивного двигателя на закиси азота. Электронагреватель прогревает катализатор перед началом работы. Газообразная закись азота, попадая в реакционную камеру, разлагается на катализаторе, образуя азот и кислород. Нагретая смесь продуктов реакции, расширяясь в сопле, создает тягу



2
Чтобы разложить закись азота, надо преодолеть барьер активации. Для этого смесь надо либо нагреть (термическое разложение), либо использовать катализатор, который снижает барьер активации



3
Лабораторный прототип однокомпонентного двигателя на закиси азота во время испытаний (выхлоп прозрачный)

и предназначался не для космоса, а для военной техники. До производства дело не дошло по двум причинам. Чтобы не разорвало топливные баки при испарении жидкости (критическая температура закиси азота находится в диапазоне рабочих температур 36,5°C), пришлось бы увеличить толщину стенок, что сильно утяжеляло конструкцию. Также были опасения, что протечки веселящего газа могут в бою одурманить пилотов. В 2000 году в университете штата Алабама (США) все-таки прошло успешное испытание жидкостного двигателя на закиси азота и пропане (его удельный импульс был около 330 сек.).

Гибридные двигатели тоже начали испытывать до войны. В 1937 году бывший офицер русской кавалерии Леонид Андрюсов с Отто Лутцем и Вольфгангом Ногератом опробовали в Германии гибридный двигатель с тягой 10 000 Н, работающий на закиси азота и древесном угле. Потом эти работы прекратили, поскольку из-за высокой теплоты сублимации уголь плохо выгорал. Однако за десять лет, начиная с 1985 года, американская компания «AMROC» осуществила 31 испытание гибридного ракетного двигателя на закиси азота. В дальнейшем эти работы продолжила компания «SpaceDev», которая разработала гибридный двигатель для первого в мире ракетоплана (аппарат, совмещающего черты ракеты и планера) и дважды запустила его в 2004 году на высоту 100 км (рис. 4). Двигатель ракетоплана работал на закиси азота и бутадиеновом каучуке,



4
Полет ракетоплана «SpaceShipOne», оснащенного гибридным ракетным двигателем на закиси азота (окислитель) и бутадиеновом каучуке (твердое топливо)

развивал тягу 73 500 Н, а его удельный импульс равнялся 250 сек. Поскольку задача была — вывести космический аппарат на орбиту, то двигатель запускали только один раз с помощью пороха.

Однако, чтобы космический аппарат смог маневрировать на орбите, двигатель придется включать не один, а много раз, поэтому пороховой воспламенитель не подходит. Задачу решили, совместив гибридный двигатель и газогенератор на закиси азота: горячий выхлоп обогащенной кислородом газовой смеси (800—1000°C) воспламеняет твердое топливо и сможет обеспечить многократные маневры на орбите. Лабораторный прототип такого гибридного двигателя, работающий на закиси азота и оргстекле (полиметилметакрилат), а также на бутадиеновом каучуке, успешно испытали в 2005 году в Китае.

Однокомпонентные и двухкомпонентные ракетные двигатели на закиси азота пока находятся на разных стадиях разработки. Между тем для маневров космических и летательных аппаратов закись азота уже используют.

Маневры в космосе

Космические аппараты бывают большие и малые. К большим обычно относят аппараты с массой 1000 кг и выше, а к малым — меньше 500 кг, выполняющие различные задачи народного хозяйства: метеорологии, связи, наблюдения и многие другие. Одна из их функций — обкатка новых

технологий на орбите. Сегодня такие малые космические аппараты выводят на орбиту, как правило, в качестве «попутной полезной нагрузки» вместе с большими аппаратами, ради которых, собственно, и производят запуск. Обычно на ракетах-носителях остается небольшой запас по массе (то есть они могут вывести на орбиту немного больший вес, чем масса большого аппарата), а чтобы обеспечить точность выведения, этот запас нужно скомпенсировать. Раньше космические аппараты не могли сделать достаточно компактными, поэтому запас по массе компенсировали балластом — обычными металлическими болванками. Когда появилась полупроводниковая электроника и бортовое оборудование стало достаточно миниатюрным, балластный груз заменили малыми космическими аппаратами. Так что сегодня современные ракетоносители используются более эффективно.

Но у этого удобного решения есть недостаток: малые аппараты можно вывести только на те же орбиты, что и основную «полезную нагрузку». Между тем есть много интересных орбит, которые в настоящее время недоступны для использования. Запускать на них специальные ракетоносители с малыми аппаратами нерентабельно. Оптимальное решение — оснастить малые космические аппараты собственной двигательной установкой, чтобы они могли сами маневрировать на орбите.

К сожалению, сегодня малых аппаратов с собственными двигателями еще совсем немного, поскольку оказалось, что у этой задачи есть целый ряд ограничений. Чтобы стало понятно, с каким типом проблем сталкиваются инженеры и почему так перспективна закись азота, надо на этом остановиться подробнее.

Принципиальное отличие малых космических аппаратов от больших в том, что если для последних главное ограничение — масса, то для первых главное ограничение — объем, а точнее, габариты. Во время пуска малые аппараты устанавливаются в узком зазоре

У реактивного двигателя есть две важные характеристики: удельный импульс и тяга. Удельный импульс — это отношение создаваемого количества движения к весовому расходу топлива, иными словами, экономичность двигателя. Чем больше удельный импульс, тем меньше потребуется топлива, чтобы совершить маневр. Тяга — это сила, с которой двигатель толкает космический аппарат.



ТЕХНОЛОГИИ

Ограничения для малых космических аппаратов (масса, объем баков, электрическая мощность)

Ограничения	Наноспутники	Микроспутники	Мини-спутники
Масса, кг	1—10	10—100	100—500
Объем баков ДУ, литры	<1	7	50
Эл. мощность на борту (среднеорбитальная), Вт	6	14	180
Цена, доллары	1 000 000	3 000 000—5 000 000	10 000 000

между главной полезной нагрузкой (то есть основным запускаемым аппаратом) и внутренней стенкой головного обтекателя ракетносителя. Если случится небольшой перевес по массе, то он обычно вписывается в допуск, а вот габариты превышать нельзя — ведь величина зазора остается неизменной. Это означает, что малые космические аппараты должны быть строго определенных размеров, которые, в свою очередь, определяют запас топлива и электроэнергии для их двигателей.

Здесь одно тянет за собой другое. Малые аппараты делятся по массе и габаритам на мини-, микро- и наноаппараты. От габаритов зависят размеры их солнечных батарей. Поскольку при уменьшении линейного размера площадь уменьшается в квадрате, то и вырабатываемая батареями электроэнергия уменьшается так же.

Еще хуже дело обстоит с запасами электроэнергии и топлива на борту малых аппаратов, поскольку с уменьшением линейного размера объем уменьшается в кубе. Соответственно запасы электроэнергии в аккумуляторных батареях на борту малых аппаратов весьма скромные (см. таблицу), из-за чего для них невозможно использовать большинство эффективных электроракетных двигателей. Но запасы топлива в них оказываются еще меньше, чем запасы электроэнергии. После достижения определенного порога при дальнейшем уменьшении размеров топливного бака отношение его сухой массы к массе хранящегося в нем топлива возрастает, а массовая доля топлива катастрофически уменьшается.

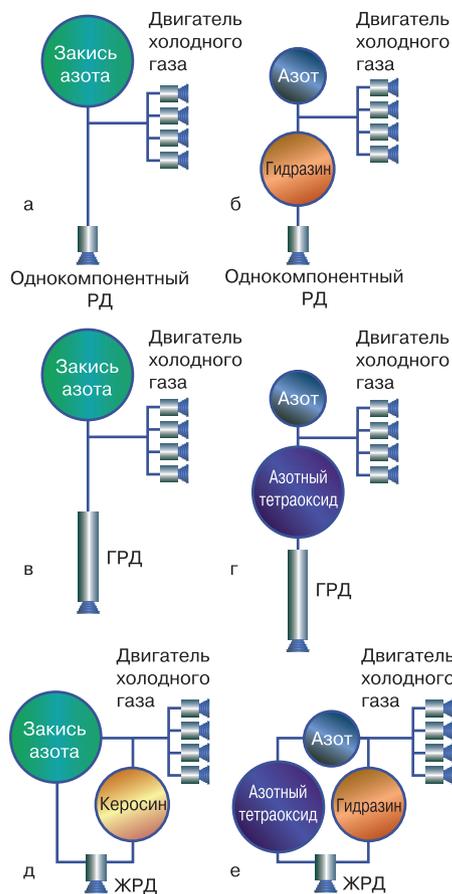
В малых аппаратах она падает ниже 30%, а часто и ниже 8%. Это означает, что приращение скорости, от которого зависит способность аппарата маневрировать на орбите, определяется уже не столько удельным импульсом двигателей, сколько запасом топлива на борту. Иными словами, стирается разница между двигателями холодного газа на закиси азота (удельный импульс 59 сек.) и азоте (73 сек.);

однокомпонентными двигателями на закиси азота (160 сек.) и гидразине (220 сек.); а также двухкомпонентными двигателями на закиси азота/керосине (320 сек.) и тетраоксиде азота/моно-метил-гидразине (290 сек.). Решающим фактором для увеличения скорости становится запас топлива на борту. И чем меньше габариты космического аппарата, тем сильнее ощущается дефицит топлива.

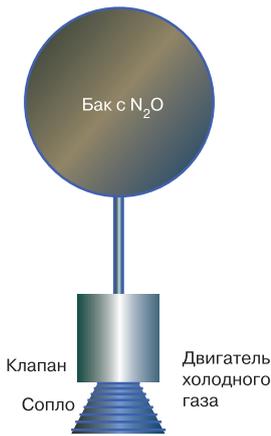
В такой ситуации на первый план выходит плотность топлива — ведь чем больше его удастся заправить в бак, тем больше будет и приращение скорости космического аппарата. И здесь закись азота имеет очевидное преимущество. Например, при использовании азота (давление в баке 200 атм., плотность около 230 кг/м³) можно получить приращение скорости малого аппарата массой 40 кг только в 1—3 м/сек., а для маневрирования обычно надо больше 20 м/сек. Жидкий гидразин N₂H₄ (плотность около 1004 кг/м³, казалось бы, должен дать существенные преимущества в приращении скорости по сравнению с закисью азота (плотность 745 кг/м³), но поскольку давление насыщенных паров у гидразина низкое, то потребуются дополнительная система для выдавливания его из баков. Конструкция утяжеляется, и все преимущество пропадает.

Напротив, для больших космических аппаратов закись азота, к сожалению, не очень подходит. Хотя там тоже хорошо было бы заменить гидразин другим менее токсичным топливом. Дело опять же в соотношении: чем меньше размер топливного бака, тем большее давление он выдерживает при одинаковой толщине стенки. Наоборот, в больших баках высокое давление закиси азота (50 атм.) вынуждает увеличивать толщину стенки, что намного утяжеляет конструкцию (из-за этого немцы в 1937 году бросили эту затею, см. выше). В результате в больших ракетных установках используют топлива с низкими давлениями, а поскольку они не могут выдавливать себя из баков, это делают специальные турбонасосные агрегаты.

В последние годы все чаще обсуждают идею создания групп малых аппаратов, которые будут маневрировать совместно, «в связке». У таких комплексов должны быть многофункциональные двигательные установки, которые смогут и ориентировать аппарат, и сменить орбиту, и обеспечивать другие маневры. Очевидно, что для этого потребуются различные типы ракетных двигателей. Например, двигатели на азоте можно использовать для ориентации аппаратов, однако с их помощью далеко не улететь. Двигатели на гидразине могут выполнить эту задачу, но слишком мощны для тонкого маневрирования и ориентации малых аппаратов. Если скомбинировать эти две системы, то доля топлива в общей массе станет еще меньше (особенно при использовании холодного газа).



5 Многоцелевые двигатели космических аппаратов, работающие на закиси азота (а, в, д), и альтернативные схемы на традиционных топливах — гидразине и тетраоксиде азота N₂O₄ (б, г, е). Азот выполняет две функции: используется как топливо в двигателях холодного газа и для выдавливания жидких компонентов топлива из баков. РД - реактивный двигатель, ГРД - гибридный реактивный двигатель, ЖРД - жидкостной реактивный двигатель

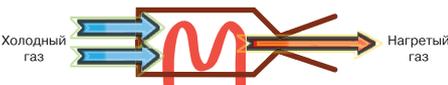


6
Схема двигателей холодного газа. Газ, хранящийся под давлением в баке на борту космического аппарата, по трубопроводу поступает в двигатель, который заканчивается расширяющимся соплом. Когда клапан между ними открывается, газ вытекает из двигателя, расширяется в сопле и создает тягу

Простое решение

Вместо комбинирования двигателей, работающих на разных компонентах, например, азоте и гидразине, для малых космических аппаратов менее 100 кг можно использовать двигатели на закиси азота (рис. 5). Это будет всего один топливный бак (плотность закиси азота 745 кг/м^3 , и давление около 50 атм.), к которому подсоединят различные типы реактивных двигателей — каждый из них будет обеспечивать свой маневр.

Так, для ориентации аппарата подойдут двигатели холодного газа (рис. 6), удельный импульс которых вполне достаточен (59 сек.), чтобы изменить ориентацию космического аппарата. Для небольших маневров годятся электронагревные или однокомпонентные двигатели. Если газообразную закись азота подогреть, удельный импульс такого устройства вырастет до 200 сек. (рис. 7). Электронагревный двигатель (рис. 8) уже испытали на борту



7
Схема электронагревного двигателя

мини-спутника UoSAT-12, запущенного в 1999 году. На орбите также провели его холодные пуски (без нагрева) и подтвердили возможность хранения закиси азота в баках на орбите более двух лет.

На орбите закись азота хранится в баке в жидком состоянии. Поскольку у нее высокое давление насыщенных паров, она не только сама выдавливает себя из бака, но ее можно использовать и для выдавливания из бака горючего компонента топлива. Это, безусловно, делает конструкцию двигательной

установки более простой, надежной и легкой. Очевидно, что вариантам, работающим на закиси азота, понадобится меньше баков для хранения, поскольку они имеют на один компонент топлива меньше.

Еще одно преимущество: любой двигатель может использовать закись азота до конца. При необходимости она может пойти только на ориентацию или только на маневры. Такая гибкость управления очень удобна при внештатных ситуациях, когда аппарат оказывается на нерасчетной орбите. С азотом и гидразином так не получится, поскольку если использовать весь азот, то нечем будет выдавливать гидразин из баков, а если использовать весь гидразин, то остаток азота можно использовать только как холодный газ с низким удельным импульсом и тягами.

Закись азота стабильна, нетоксична, неогнеопасна и совместима со всеми материалами и элементами двигательной установки. Это выгодно ее отличает от токсичного и огнеопасного гидразина и высокотоксичного тетраоксида азота. Кроме того, последние два топлива могут вызывать коррозию топливной системы космического аппарата. Достаточно сказать, что при заправке аппаратов гидразином и тетраоксидом обслуживающий персонал работает в специальных комбинезонах с автоном-



8
Электронагревный двигатель «Mark-IV». Тяга в вакууме 0,14 Н; удельный импульс 110 сек.

ной системой подачи воздуха. Заправка закисью азота не требует специальных мер безопасности, ее может выполнять один человек.

Важное ограничение для любой технологии — цена. Существующие технологии с гидразином дороги. Самый дешевый однокомпонентный ракетный двигатель на гидразине стоит около 30 000 долларов, сами топлива — 80—160 долларов за килограмм. А заправка гидразином малых аппаратов обходится примерно в 100 000 долларов

— эксплуатация чрезвычайно дорогая из-за вредности топлива. Это очень дорого, если сравнить с нетоксичной закисью азота, которая стоит 3—5 долларов за килограмм и не требует никаких специальных мер защиты.

Поскольку при испарении закиси азота потребляется большое количество тепла, она вполне подойдет и для охлаждения элементов и узлов космических аппаратов. Оборудование, которое требует охлаждения, можно монтировать на стенках бака с закисью азота либо помещать прямо в бак.

Получается, что закись азота — фактически универсальное топливо. Она компактна, может выполнять много функций, потребляет мало энергии и дает сравнительно высокие тяги ракетным двигателям. Все это особенно перспективно для малых низкоорбитальных спутников, которым по разным технологическим причинам не подходят ни импульсные плазменные двигатели, ни ракетные двигатели твердого топлива. На низких орбитах сила аэродинамического торможения, сводящая спутник с обиты, прямо пропорциональна габаритам космического аппарата. Поэтому там двигатель должен развивать относительно высокую тягу, чтобы скомпенсировать аэродинамическое сопротивление. При этом двигатель должен потреблять мало энергии, поскольку из-за того же аэродинамического сопротивления трудно нарастить солнечные батареи. Двигатели на закиси азота отвечают этим условиям.

Итак, на орбите уже побывали гибридный ракетный двигатель на ракетоплане и электронагревный двигатель на мини-спутнике UoSAT-12. Работы по этим направлениям продолжают вести разные страны (Россия, Китай, Франция), поскольку для небольших аппаратов с маленькими баками закись азота — действительно удобная замена токсичному гидразину. Следующим шагом станет создание многофункциональных двигательных установок. Вот так веселящий газ находит нешуточное применение даже в космосе.

