

КЛАССНЫЙ ЧАС ПО ТЕМЕ:  
**ЭКОЛОГИЯ**  
**КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ**  
(ЗАГРЯЗНЕНИЕ КОСМОСА)



Цель: Ознакомить учащихся с проблемой загрязнения ближнего космоса

Задачи:

- 1. Воспитание экологического подхода в решении технических вопросов
- 2. Проблемы утилизации космического мусора

## Содержание

1. Вступление
2. Выбросы вредных газов
3. Твердые частицы
4. Что взлетает, то и падает
5. Космический мусор

## Вступление

***Новое слово в освоении космоса — запуск частных космических аппаратов — позволит многое прояснить в области, касающейся обеспечения экологичности полетов***

Сегодня космическая промышленность развивается стремительными темпами, невиданными со времен высадки человека на Луну. Еще 50 лет назад почти все, что было связано с космосом, финансировалось государством. В XXI в. космические аппараты чаще всего создаются за счет корпоративных инвестиций или средств частно-государственных предприятий.

Не связанная с государством глобальная космическая промышленность все в большей степени развивается и функционирует подобно тому, как эволюционирует авиация в масштабах планеты. Это касается возможности повторного использования комплектующих, организации штатного режима запуска летательных аппаратов, массового производства космических кораблей и ракет-носителей.

Согласно прогнозам аналитиков, к 2040 г. вклад космической отрасли в мировой ВВП превысит однопроцентный порог. Основываясь на реальных данных, можно смоделировать сценарий развития промышленности, где ее авиационная и космическая отрасли будут иметь сопоставимое экономическое значение.

Со времен Второй мировой войны в основе значительной части наиболее продвинутых разработок в области конструирования летательных аппаратов и силовых установок лежат соображения экологичности, особенно это касается проблемы вредных выбросов реактивных двигателей. Сегодня они производят значительно меньше сажи и других загрязняющих воздух веществ, чем 50 лет назад. Усилия инженеров, направленные на снижение выбросов реактивных двигателей, имели большую ценность для авиастроения в целом, поскольку оптимизация процесса сгорания в турбине позволяла довести ее КПД почти до теоретически максимального значения, что уменьшало расход топлива. Это было выгодно авиакомпаниям и благоприятно сказывалось на экологии планеты.

Вопрос экологичности не представляется серьезной проблемой при развитии космических систем. Ракетные двигатели, как и реактивные, выбрасывают в атмосферу самые разные газы и частицы, что может приводить к негативным локальным и даже глобальным последствиям. Но при этом воздействие ракет-носителей на окружающую среду обычно не учитывалось. Разработчики ограничивались простым сравнением расходов топлива реактивными двигателями и ракетами.

Соображения по этому поводу выглядят следующим образом: ракетные двигатели сжигают лишь 0,1% от того топлива, которое самолеты сжигают ежегодно, поэтому количество их вредных выбросов составляет лишь 0,1% по сравнению с авиационными. Но это не совсем адекватный метод сравнения. Тщательное изучение каждой фазы космического полета показывает, что космические выбросы могут влиять на атмосферу совсем по-другому, чем авиационные, а в некоторых случаях наносят ей значительно больший вред.

В отличие от авиадвигателей выбросы космических аппаратов сказываются на всех слоях земной атмосферы. Выбросы от реактивных двигателей быстро опускаются вниз из тропосферы вместе с атмосферными осадками, а от ракетных попадают в стратосферу и удаляются из нее очень медленно. Они накапливаются годами, «складируясь» в течение четырех-пяти лет. Важно и то, что и без этого тонкий озоновый слой в стратосфере особенно сильно истончается там, где скапливаются ракетные выбросы.

Перспективы космических путешествий никогда не были столь захватывающими, как сегодня. Достижения в космической отрасли, в том числе создание высокоспециализированных малых космических аппаратов и низкоорбитальных мегаспутников, разработка новых видов ракетного топлива и возможность добычи ископаемых на Луне, стимулируют развитие «нового космоса» XXI в. Эти разработки могли бы воплотить в жизнь давнюю мечту человечества — сделать космические полеты такими же обычными, как и путешествия в воздушном пространстве. Но следуют ли эти новые космические технологии по пути сохранения экологии на нашей планете?

## Выбросы вредных газов

Эмитируемые из ракетных и реактивных двигателей вещества состоят в основном из диоксида углерода и водяных паров; их глобальное воздействие хорошо изучено. Выбрасываемый на любой высоте диоксид углерода — долгоживущий парниковый газ (ПГ), добавляемый к и без того имеющимся в атмосфере ПГ. Пары воды представляют собой недолговечный ПГ. Эти компоненты ракетных выбросов составляют небольшую долю в 1% от авиационных выбросов  $CO_2$  и  $H_2O$ . Их нынешнее вредное воздействие невелико, однако некоторые малые по объему компоненты выхлопных газов ракетных двигателей вызывают опасение.

Окислитель твердотопливного ракетного двигателя (ТТРД) — перхлорат аммония — содержит хлор, представляющий наиболее серьезную угрозу озоновому слою стратосферы. Отбор проб из шлейфа ТТРД, осуществленный 20 лет назад с помощью самолета *NASA*, показал, что вредные выбросы этих двигателей образуют в озоновом слое минидыры, которые сохраняются в течение нескольких дней после запуска ракеты. Однако эти дыры исчезают по мере того, как насыщенные хлором шлейфы смешиваются со стратосферными газами, так что суммарное количество хлора, выбрасываемого твердотопливными двигателями ежегодно, оказывается незначительным, а кроме того, этот газ недолговечен по сравнению с хлором, выделяемым пресловутым фреоном (хлорфторуглеродами). Скорее всего, содержащийся в шлейфе ТТРД хлор не несет серьезной угрозы для озонового слоя.

Ученым хорошо известно, как  $CO_2$ ,  $H_2O$  и  $Cl$ , входящие в состав выбросов ракет, влияют на климат на нашей планете и озоновый слой. Как показывают исследования, их вредное воздействие незначительно по сравнению с таковым других источников загрязнения. Даже если уровень ракетных выбросов увеличится на порядок, ничего страшного не произойдет. Однако есть один компонент выбросов ракет, который нельзя сбрасывать со счетов: это частицы сажи и оксида алюминия.

## Твердые частицы

За летящей ракетой тянется зрелищный шлейф из продуктов горения. «Пламя» ракетного двигателя на углеводородном топливе состоит в основном из раскаленных частиц сажи, окисляющихся в шлейфе. Ее образование в ракетных двигателях — сложный и не до конца изученный процесс. Сажа образуется в насыщенных топливом камерах сгорания, на стенках сопел и в турбонасосных агрегатах: она частично распадается в горячем шлейфе. У реактивных двигателей не такая сложная конструкция, и они намного экологичнее, чем ракетные силовые установки. Некоторые типы ракетных двигателей, работающих на углеводородном топливе, выделяют в сотни раз больше сажи на каждый килограмм сгоревшего топлива, чем их «родственники» — реактивные двигатели. Реактивные самолеты лишь изредка достигают пределов стратосферы, ракеты же входят в стратосферу при каждом запуске.

Чем опасно наличие частиц сажи в стратосфере? Дело в том, что черная углеродистая сажа интенсивно поглощает солнечный свет. Эта энергия передается окружающему воздуху, что в свою очередь может повлиять на циркуляцию атмосферного воздуха. Поскольку концентрация озона обратно пропорциональна температуре окружающей среды, стратосфера, имеющая более высокую температуру, в большей степени способствует истощению озонового слоя. Достаточно ли велико количество сажи, выбрасываемой двигателями нынешних космических ракет, чтобы существенно повлиять на атмосферу? Этого мы пока не знаем: существующие климатические модели находятся в стадии разработки.

Шлейф ТТРД производит еще большее впечатление, чем шлейф от ракетных двигателей, работающих на жидком углеводородном топливе. Из сопла ТТРД вырываются раскаленные добела частицы

оксида алюминия, отчего шлейф напоминает языки пламени. Как и в случае с выбросом газообразного хлора, шлейф расплывается и в конце концов смешивается с атмосферой Земли, так что частицы оксида алюминия обнаруживаются в случайных пробах воздуха в стратосфере от экватора до полюсов. В 1990-х гг. исследователи обнаружили, что на поверхности частиц протекают химические реакции, разрушающие озон, но роль оксида алюминия в разрушении озонового слоя неизвестна. Кроме того, ТТРД выбрасывают газообразный хлор, тоже воздействующий на озон. Но в целом механизм влияния выхлопных газов ТТРД на озон изучен недостаточно. В 2018 г. Всемирная метеорологическая организация признала, что в нашем понимании этого вопроса существуют большие пробелы, и указала на необходимость дальнейших исследований в этой сфере.

ТТРД, которыми были оснащены космические челноки, были самыми большими двигателями этого типа, и часто ошибочно полагали, что эра крупных твердотопливных ракет закончилась, когда челноки были «отправлены на пенсию». Однако сегодня ТТРД используются для запуска ракет все чаще. В ноябре 2021 г. ТТРД диаметром 3,66 м, установленные на американской сверхтяжелой ракете-носителе, выведут в космос тяжеловесный аппарат NASA следующего поколения; это будут самые большие твердотопливные ракетные двигатели в истории. Но и их превзойдет китайский 3,96-метровый ТТРД, дебютный запуск которого запланирован на 2025 г. Тенденция увеличения размеров ТТРД может представлять угрозу озоновому слою стратосферы.

### **Что взлетает, то и падает**

С выходом ракеты за пределы атмосферы Земли загрязнение космоса не прекращается. Вопреки многочисленным публикациям в СМИ о недавнем эффектном возвращении в атмосферу космического мусора, по пути на Землю орбитальный мусор не исчезает и не сгорает. Некоторые элементы и узлы отслужившего свой век и брошенного космического аппарата достигают поверхности планеты. Большинство его деталей испаряются, превращаясь в раскаленный газ, который быстро конденсируется, образуя крошечные частицы. В отличие от частиц с простым химическим составом, выбрасываемых во время запуска ракеты, остатки возвращающегося в атмосферу космического мусора представляют собой целую россыпь сложных химических веществ. На высоте около 85 км топливные баки, электронное оборудование, солнечные батареи и другие элементы конструкции космического корабля испаряются. Продукты этого процесса, опускаясь вниз, скапливаются в стратосфере и смешиваются с выброшенными при запуске ракет сажей и оксидом алюминия. Возвращение в атмосферу сопряжено с таким же загрязнением окружающей среды, как и запуск.

Многочисленные низкоорбитальные спутники, образующие своего рода созвездия, в конце срока службы, при входе в плотные слои атмосферы, будут уничтожены. Предполагается, что ежегодно утилизацию пройдут сотни тонн нефункционирующих спутников. Большая часть этой массы превратится в мельчайшие частицы и останется в средних слоях атмосферы. Относительно образования пыли при входе спутников в атмосферу, а также о ее влиянии на климат нашей планеты и на озоновый слой известно очень мало.

Космическая индустрия вступила в фазу роста, как это было с авиационной промышленностью на заре ее развития. Как только та или иная технология становится составляющей рыночной экономики, возможности ее нового применения стремительно расширяются. И подобно своему старшему брату, авиаиндустрии, космическая промышленность становится источником выбросов вредных газов и частиц в атмосферу в результате работы силовых установок. Насколько по-разному эти две отрасли повлияют на атмосферу Земли — станет ясно после того, как будет проведен сравнительный анализ авиационных и космических выбросов.

В любом случае в обозримом будущем уровень выбросов углекислого газа реактивными двигателями будет существенно выше такового ракетных силовых установок. Это нашло отражение при расчетах условного углеродного следа для космического пространства. Но  $CO_2$  играет далеко не главную роль в загрязнении космоса. Мельчайшие взвешенные частицы, выбрасываемые при запуске ракет и возвращении космического мусора в атмосферу, приводят к гораздо более серьезным изменениям химии атмосферы, динамических показателей и радиации, чем выбросы  $CO_2$  ракетных двигателей. Углеродный след — это сложная история, пока не получившая четкого определения.

Недавняя дискуссия по поводу яркого свечения низкоорбитальных спутников показывает, что экологичность должна стать фундаментальным аспектом развития космической отрасли. Обеспечивать безопасность эксплуатации космических систем будет проще, если оценивать заранее воздействие на окружающую среду каждого этапа жизненного цикла системы. Именно так рассма-

тривается проблема экологичности в авиационной промышленности. В противном случае приходится прибегать к корректировке. Только всесторонний анализ экологичности до развертывания системы спутников позволит обойтись без нее.

По иронии судьбы именно космос может обеспечить человечеству перспективу, необходимую для управления нашей планетой. Картину, открывающуюся с борта «Аполлона-8» во время восхода Солнца на Земле, часто ассоциируют с началом глобального экологического движения. Но сама проблема выбросов в космос слишком слабо изучена, чтобы ответить на фундаментальные вопросы их воздействия на окружающую среду. Соответствующая научная программа должна включать исследование шлейфов при запуске и возврате аппаратов, детальное моделирование шлейфов от момента недавнего запуска до стационарного состояния глобального перемешивания, а также лабораторное изучение микрофизики частиц, образуемых от запуска до возвращения. Во всех мероприятиях должны принимать участие как государственные, так и коммерческие структуры.

Космическая промышленность становится значимой частью мировой экономики как раз в то время, когда проблема экологичности приобретает глобальный характер. Что будет представлять собой экологичная космическая индустрия? Каковы угрозы делу освоения космического пространства в будущем? Мы не узнаем ответов на эти вопросы, пока не реализуем долговременную международную программу по исследованию вредных выбросов космических аппаратов.

### **КОСМИЧЕСКИЙ МУСОР**

Проблема космического мусора, уже сегодня чрезвычайно остра и актуальна. Илон Маск сейчас строит сеть спутникового интернета, собирается запускать на орбиту огромное количество спутников. Но там уже летает много всякого безобразия. Мусор на орбите вокруг Земли движется со скоростью пули, выпущенной из автомата Калашникова. Даже маленький пятисантиметровый кусочек, влетая в спутник, превращает его в космический мусор.

Я считаю, что человек несет большую ответственность за то, что он после себя оставляет в космосе. Увы, нет еще ни одного проекта, который реально занимается вопросом утилизации космического мусора и очисткой орбиты.

**Источник: В мире науки (SCIENTIFIC AMERICAN)**

Ежемесячный научно-информационный журнал, апрель 2021

**Интернет ресурс:** [www.sci-ru.org](http://www.sci-ru.org) 4 2021