

ОТ ЛАМИНАРНОГО ПЛАМЕНИ ДО ТОРНАДО,

ИЛИ ЧЕМ ПЛОСКОЕ ПЛАМЯ ОТЛИЧАЕТСЯ ОТ ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ

В связи с публикацией на страницах журнала статьи «На пути к детонационному двигателю» (Ф. А. Быковский и др.) в рубрике «Факультет» мы решили более подробно рассказать читателям об эволюции процесса горения — от простейшего ламинарного до турбулентного. А также рассмотреть режим высокоскоростного вихревого течения при организации тангенциального вдува в цилиндрическую камеру с наложением детонационной волны, распространяющейся поперек потока горючей смеси. В результате организуется течение, представляющее собой микроаналог «торнадо»

Может быть, самое загадочное явление природы, завораживающее взгляд, — это пламя. Поразительно, что из всего разнообразия животного мира только человек подружился с этим ничем не заменимым горячим другом, защитником и кормильцем, которому он обязан выживанием, а может быть, и существованием вообще. Завораживающий внешний вид и обжигающее внутреннее содержание огня напоминают бесплотный дух живого существа, которое одновременно весело пляшет в снопах разноцветных искр и зорко высвечивает во тьме алчущих, но напуганных хищников.

С прагматической точки зрения, мы вынуждены изучать нечто более прозаичное — не мистическое начало огня, а физику и химию процесса горения.

Что такое фронт пламени и как он «приклеивается» к своим границам, или Штиль на голубом море

Простейший вид пламени — это ламинарное горение гомогенной горючей смеси. Гомогенная горючая смесь — это предварительно смешанные до молекулярного уровня компоненты топлива и окислителя (химические реагенты), способные к локальной экзотермической реакции при разовом локальном подводе, достаточной для инициации тепловой энергии. Далее, самопроизвольно (автоматически) запускается механизм пространственной и временной самоорганизации ламинарного горения, когда исходная смесь и продукты горения за короткое время оказываются отделены друг от друга тонкой прозрачной флуоресцирующей непрерывной границей, принимающей форму поверхностной «пленки» — зоны,

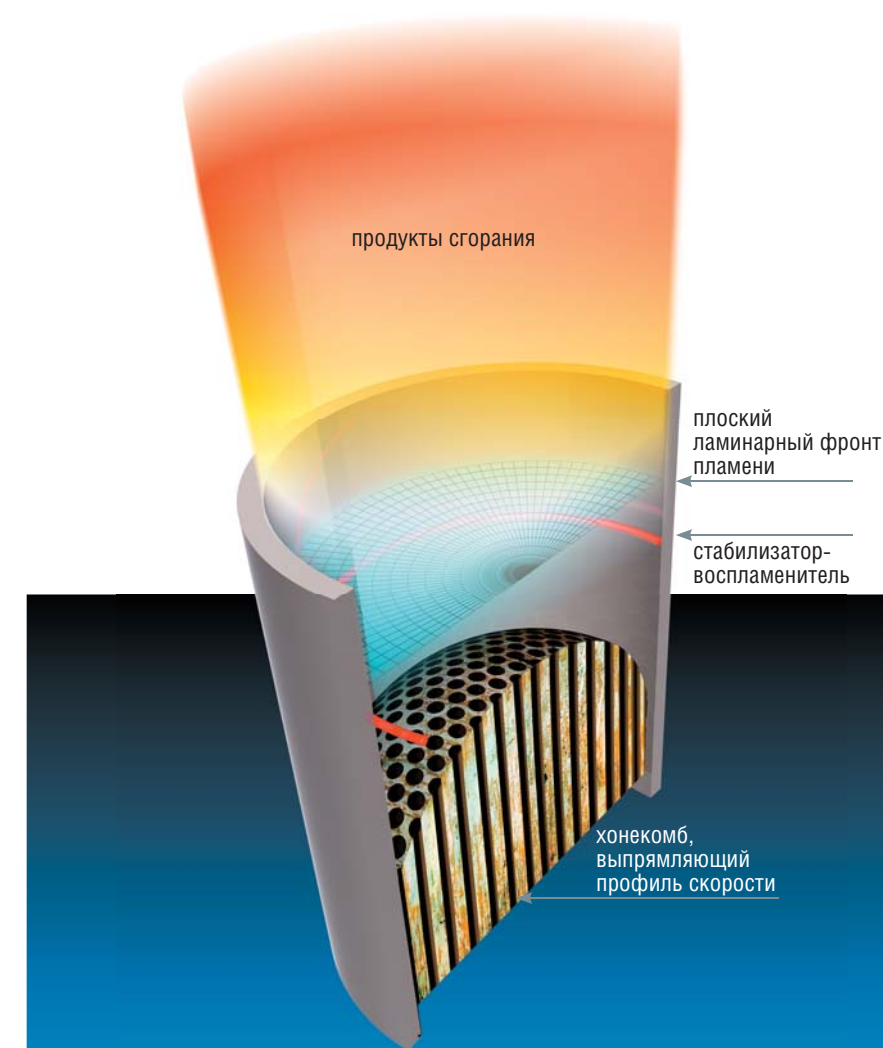
где происходит химическая реакция топлива с окислителем. Эту поверхность называют «фронтом пламени». Как правило, при ламинарном (невозмущенном) режиме течения она принимает форму профиля скорости потока, что свидетельствует о том, что скорость горения, направленная по нормали к поверхности фронта, одинакова для всех его точек. Так ее и принято называть: «нормальная скорость горения». Ясно, что в тонкой пленке фронта горения (обычно порядка миллиметра и менее) происходит «превращение» холодной горючей смеси в горячие продукты сгорания. Часто для удобства наблюдения профиль скорости искусственно выравнивают — от классического «пуазейлевского» (в виде колокола) до плоского — набором трубочек различной длины по всей площади горелки (хонеккомбами). «Приклеивание» открытых границ фронта (так называемая стабилизация пламени) осуществляется «стабилизаторами» — любыми препятствиями, создающими вихревую зону торможения потока нужной конфигурации по периметру пламени. В этой «застойной» зоне пламя горит устойчиво и является постоянным источником поджигания.

Волнение и легкий бриз — предвестник шторма

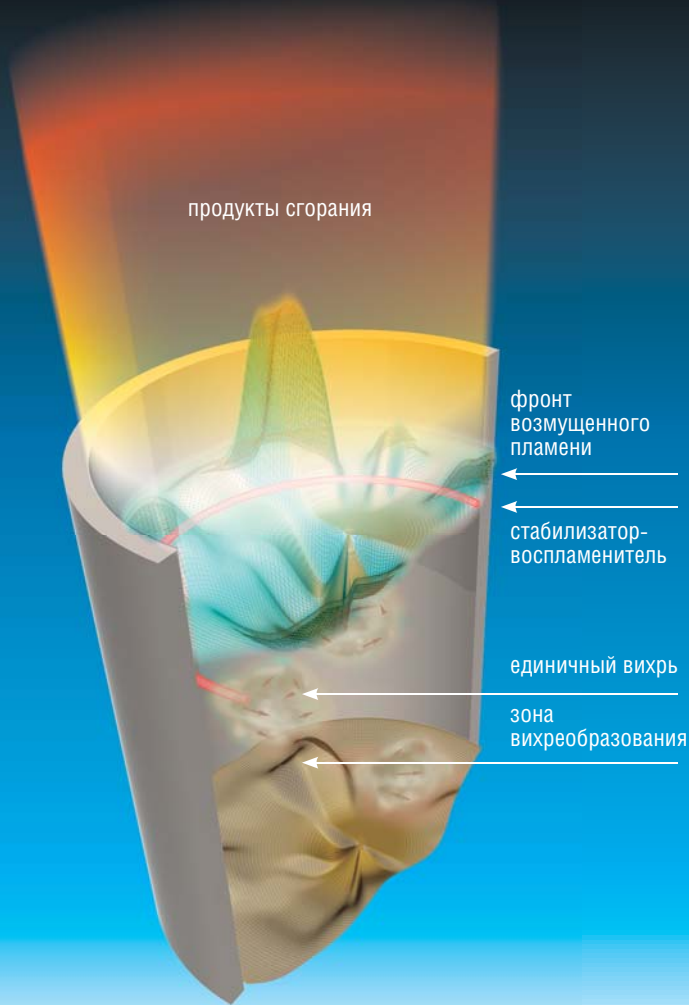
Следующий по сложности вид — это пламя первого типа с неразрывным «приклеенным» фронтом, но искривленным по поверхности крупномасштабными нерегулярными, иногда почти стохастическими или полностью хаотическими, возмущениями («гладкие» впадины и выпуклости различных фантастических форм и размеров). Это явный признак ранней стадии зарождения турбулентности, когда в сплошной, молекулярно однородной среде

генерируются виртуальные вихри: большие и маленькие, закрученные как слоенные рулеты, пузырьки с дырками и просто дырки от пузырьков. Причем рождаются они не только на стенках устройства, но и внутри потока, при сдвиговых напряжениях градиентов давления. Подобная стадия называется «инерциальным режимом вихревой генерации»,

а их поступательная и вращательная энергия проистекает из кинетической энергии всего потока. Сплавляясь вниз по потоку, вихри деформируют поверхность фронта, пропорционально увеличивается количество продуктов горения, а горючая смесь, соответственно, исчезает и растет интегральное теплосодержание пламени.



Ламинарное пламя с плоским неразрывным фронтом и с плоским профилем скорости горючей смеси



Возмущенное пламя с гладко гофрированным неразрывным фронтом и с крупномасштабным вихревым течением горючей смеси

Шторм турбулентный дует в парус-фронт

С дальнейшим увеличением напряженности потока, характеризующимся возрастанием числа Рейнольдса (пропорционального произведению скорости потока на

диаметр устройства), увеличивается и амплитуда скоростей вихрей. Крупные начинают раскалываться, пузырьки ломаются и трескаются, сталкиваются с большими скоростями, барабнят во фронт пламени и рвут его в клочья.

Наступил финальный, турбулентный, режим течения, и фронт пламени не только сильно гофрирован, но и прорван энергетически

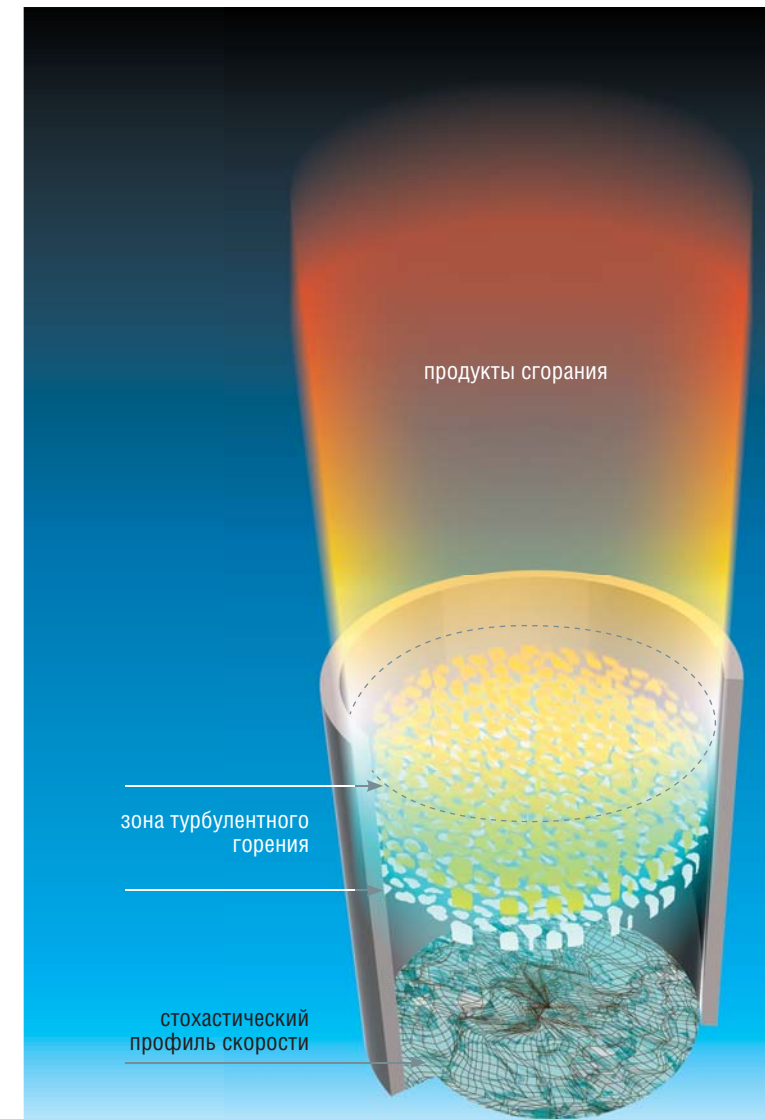
сильными вихрями. Образовалась область, «кипящая» всевозможными неоднородностями, состоящими из перемешанных обрывков пленки фронта пламени, зон гомогенной горючей смеси, а также из смеси горячих продуктов горения и холодного топлива. В плохо сбалансированном двигателе толщина слоя может быть настолько большой, что топливо будет заброшено в зону остывших продуктов горения, воспламенения не произойдет, а негоревшая смесь будет выброшена наружу, через выхлопную трубу, в атмосферу.

Внешне обманчиво простое явление — ламинарное гомогенное горение — это диссипативный процесс, обладающий чрезвычайно сложным, сильно неравновесным характером с позиций термодинамики и нелинейной зависимостью почти от всех физико-химических параметров.

Поскольку нормальная скорость горения конечна, а температура окружающей топливо поджигающей среды должна быть не менее температуры воспламенения, то на область существования процесса горения налагаются два наиболее существенных ограничения. Во-первых, время пребывания горючей смеси в камере сгорания должно быть больше времени реакции, в противном случае топливо будет выброшено через выходное сопло несгоревшим. Во-вторых, при интенсивном турбулентном смешении с продуктами сгорания концентрация компонентов и температура должны сохранять значения, при которых горение возможно вообще. Поэтому процесс ограничен коридором оптимальных параметров потока, что обнаруживается явно при попытке создания сверхскоростных аппаратов. Говоря иначе, существует естественный предел эффективности подобного способа сжигания топлива.

Сценарий возникновения «торнадо», или Как детонационная волна воздействует на турбулентное пламя

Процесс взаимодействия структуры турбулентного пламени с детонационными и ударными волнами носит чрезвычайно сложный характер, но отказать себе в удовольствии привести ряд качественных соображений было бы обидно: схема этого мысленного эксперимента весьма не тривиальна, наглядна и многообещающа. Речь идет о «торнадо» в микромасштабе. Действительно, когда происходит высокоскоростной тангенциальный вдув в цилиндрическую камеру сгорания с ударной волной (нормально к направлению течения горючей смеси), затягивающей, как локомотив, длинный высокоскоростной «хвост» в камеру сгорания, генерируется мощнейший раскручивающийся вверх кольцевой, центрально-симметричный моновихрь, аналог «торнадо». «Хвост» (он же «шлейф») — это сложная суперпозиция волн сжатия и разрежения, способная сформировать хоть и из разрывных клочков, но фронт пламени. Уникальное явление — «псевдоламинарный» толстый фронт из обрывков первичного ламинарного неразрывного фронта! В целом, глобальная зона горения, состоящая из совершенно неоднородных по плотности микрзон (почти фрактального характера), при взаимодействии с «воронкой» подвергается сложному механизму «динамической сепарации» по составу и теплосодержанию. Вспомним, что если интенсивными круговыми движениями помешать ложечкой чай, то образуется воронка, а по мере успокоения жид-



Турбулентное пламя с разрывным «толстым» фронтом, состоящим из «кипящей» смеси клочков фронтов, холодной горючей смеси и горячих продуктов горения

кости тяжелые чаинки собираются в «жгутик» вблизи центральной оси стакана (так называемый эффект Эйнштейна) и на дне вокруг центральной точки. Аналогичным образом возникшее внутри «торнадо» разряжение будет втягивать внутрь воронки преимущественно горячие (более «легкие») очаги пламени и неостывшие продукты горения, готовые к «всплытию»,

как воздушный шар. Толстый «псевдоламинарный» фронт, сформированный ударной волной (или несколькими ударными волнами) может быть затянут в воронку как единое целое, так как его теплосодержание высоко. Относительно холодная фракция продуктов горения и холодного несгоревшего топлива (более «тяжелая») будет отброшена центробежной силой



Эффект Эйнштейна в стакане с сильно раскрученной жидкостью с чайниками. Образование воронки: легкая фракция — воздух (внутри воронки); тяжелая — чайники (вне воронки) (а). Затухание вихревого течения: чайники устремляются к оси цилиндрического стакана, а легкая фракция (воздух) поднимается вверх (б)

и силой кариолиса на периферию, к стенкам камеры. Гидродинамические и подъемные силы, сложившись, вызовут чудовищные по силе конвективные вихри, так как скорость вращения воронки может быть звуковой и выше, а разница между температурами холодной и горячей фракций громадной. Сочетания слов «торнадо в бочке с пламенем» и «торнадо с молниями» являются почти полными аналогами в связи с тем, что параметры

этих двух явлений эквивалентны по порядку величины и фрактально подобны. Сильный перепад давления на границах неоднородностей и молекулярное трение при движении к периферии и внутрь конуса гомогенизирует смесь, уплотняя более холодную фракцию ближе к стенкам. Этот эффект дополнительного охлаждения стенки может оказаться очень полезным, так как одна из первоочередных проблем сверхзвуковых двига-

телей — перегрев стенок корпуса и камеры сгорания. Судьба более горячих фракций, втянутых внутрь конуса, тоже может оказаться очень благотворной, так как интегральное теплосодержание этой фракции увеличится, следовательно, условия для увеличения полноты выгорания топлива будут улучшаться — и это также одна из важнейших по значимости проблем, как и охлаждение. Процесс горения в камере сгорания происходит непрерывно благодаря непрерывной подаче топлива. Синхронизация скорострельности детонационного пулемета со вдувом с характерным временем выгорания топлива и с периодом релаксации торнадо в промежутке между выстрелами может существенно повлиять на интенсификацию процесса горения, особенно если возможны резонансные явления при сопряжении этих сложных явлений. Динамика усиления торнадо во время выстрела и его затухания в период между выстрелами может привести к уже упомянутому эффекту Эйнштейна, частично обратив процесс «дрейфа» фракций. А изучение пульсирующей динамики этого процесса — к неожиданным эффектам и интересным результатам, например при изучении периодического характера противотоков фракций.

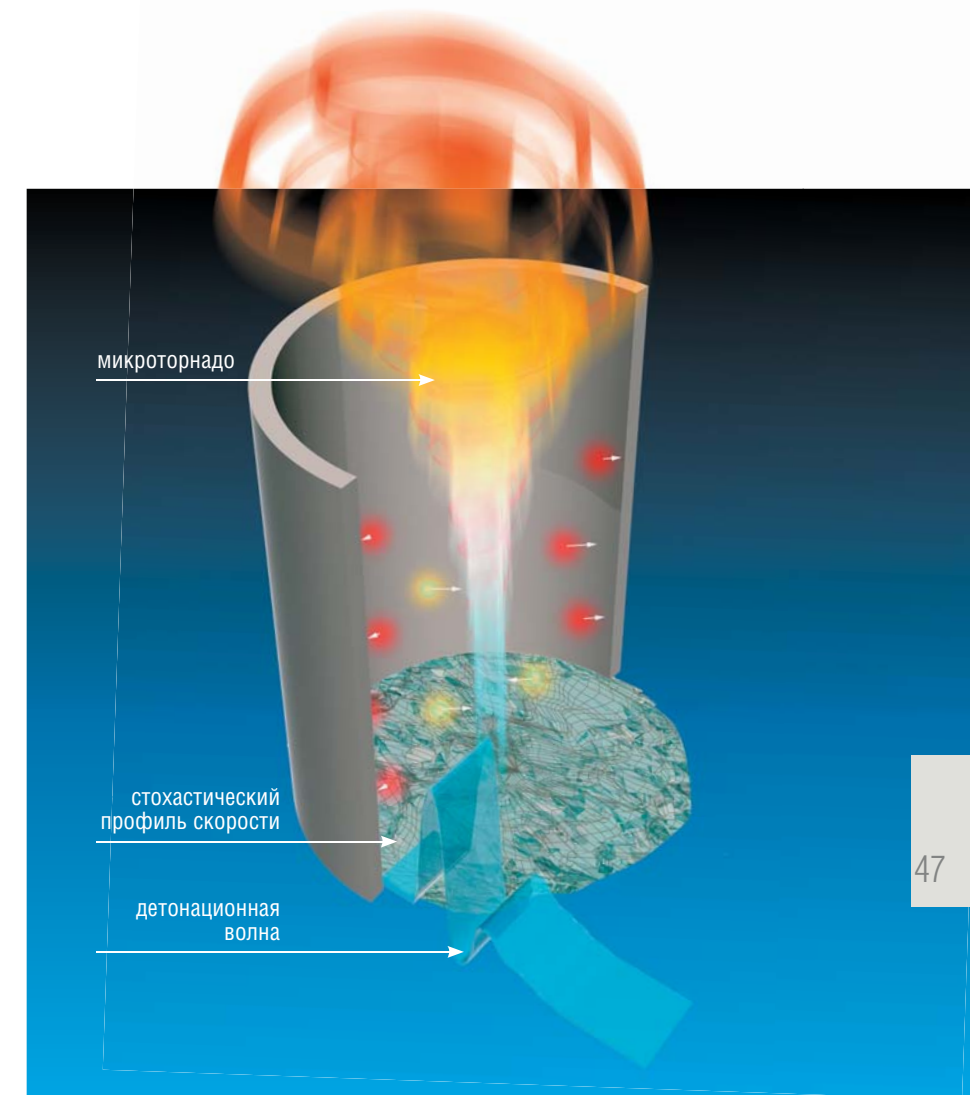
Следует упомянуть и вихревой эффект Ранка, работающий в том же направлении сепарации горячих и холодных газов, широко использующийся в различных технических приложениях. Он реализуется в процессе течения интенсивно закрученного потока по осесимметричному каналу, где первоначально термически однородный поток пространственно может быть разделен на более горячий и более холодный.

Таким образом, качественная картина процесса указывает на то, что динамический эффект «торнадо» может внести существенную лепту в модернизацию процесса турбулентного горения с целью

расширения оптимальных границ области существования, особенно применительно к использованию этого эффекта в камерах сгорания сверх- и гиперзвуковых летательных аппаратов. Рассмотренный сценарий развития микроторнадо и приведенные качественные рассуждения не бесполезны и не беспочвенны, напротив, они дают возможность, не обременяя себя деталями, наметить перспективные направления, что зачастую и делается на практике, исходя из

интуиции. Взглянуть со стороны и понять взаимосвязь многих явлений в целом, понять качественные изменения при эволюции процесса от простого к поэтапно трансформируемому, ретроспективно взглянуть и построить логически последовательную фрактальную и самоорганизующуюся цепь условий структуры — вот путь, по которому еще придется пройти.

Материал подготовил к.ф.-м.н. В.А. Суюшев



Закрученное течение смеси «кипящего слоя», свежей и сгоревшей смеси при тангенциальном вдуве с наложением детонационных чередующихся волн в виде «микроторнадо»



Комплект № 1 «Реактивные самолеты»

Серия публикаций, посвященных прошлому, настоящему и будущему реактивных самолетов и проблемам, которые приходится решать ученым при их проектировании

Комплект №1 состоит пяти номеров: № 1(4), 3(6) — 2005 г.; № 6(12) — 2006 г.; № 2(14), 3(15) — 2007 г.

ЦЕНА 350 руб.

Порядок приобретения комплекта см. на стр. 126

