

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

ЯДЕРНО - СТРУЙНЫЙ ЭКЗЕРЦИС ПАВЕЛЬЕВА

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н., профессор ФГБОУ ВО "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" (МАИ)

Представлены результаты систематических исследований турбулентности стратифицированных потоков на примере спутных дозвуковых струй и показана динамика развития течения и последовательность перехода одних режимов в другие. Проведан анализ и получены численные диапазоны, характерные для турбулентных течений: ламинарный режим, режим Толмина-Шлихтинга, градиентные волны Кельвина-Гельмгольца и развитая турбулентность. Исследования проведены в целях выбора проектных параметров хонейкомбов для ядерных энерго-двигательных установок.

The results of systematic studies of turbulence of stratified flows on the example of satellite subsonic jets are presented. the dynamics of flow development and the sequence of transition from one mode to another are shown. The analysis was performed and numerical ranges characteristic of turbulent flows were obtained: laminar mode, Tolmin-Schlichting mode, Kelvin-Helmholtz gradient waves and developed turbulence. The research was carried out in order to select the design parameters of honeycombs for nuclear power plants.

Ключевые слова: турбулентность, ядерный ракетный двигатель, хонейкомбы, спутная струя.

Keywords: turbulence, nuclear rocket engine, honeycombs, satellite jet.

В настоящее время для дальних межпланетных экспедиций безальтернативным вариантом является использование в качестве двигательных установок конструкции на базе двигателей на ядерном принципе движения. Наиболее перспективным источником ядерной энергии является генератор на основе газофазного ядерного реактора. Основной принцип действия такого реактора заключается в том, что тепловыделяющим элементом в данной конструкции (ТВЭЛом) является не традиционно твердый элемент с отверстиями для прохождения рабочего тела (водорода) в целях его разогрева, а струя урановой плазмы. В этом случае реализуется струйное стратифицированное течение, в результате которого рабочее тело нагревается до высоких температур и далее поступает на турбину для выработки электрической энергии для питания ЭРД, либо, например, в камеру ЖРД для создания удельного импульса тяги.

Преимущество такого способа использования газофазного ТВЭЛа перед твердотельным очевидное. Нагретое ядерным способом твердое тело должно обладать высочайшей термостойкостью и огромным ресурсом. Оно должно работать многоциклично продолжительное время не разрушаясь, поэтому проблема разработки материалов ТВЭЛа весьма актуальна и на сегодняшний день не решена. Все известные высокопрочные и термостойкие материалы, а это либо оксиды, либо карбиды тугоплавких металлов, в настоящее время не удовлетворяют требованиям практической космонавтики. Поэтому привлекательным является использование газофазных ТВЭЛов.

Струя урана-235 (U^{235}) одновременно выполняет две роли: роль конструкции ТВЭЛа и роль собственного тепловыделяющего элемента. Но есть большие эксплуатационные проблемы. Уран - высокорadioактивное вещество. Всегда, на протяжении всего периода эксплуатации, начиная с супругов Кюри, существовала и стоит эта проблема, проблема совместного существования подобных веществ и человека.

Люди всегда искали и ищут этим радиоактивным веществам замену. Для ядерных ракетных двигателей такая замена была найдена - это гексафторид урана UF_6 . Была найдена плазма, которая практически безвредна для человека и удобна при эксплуатации. Разработкам такого вида ТВЭЛов, с использованием гексафторида урана, посвятил свое творчество крупный российский ученый доктор технических наук, профессор МГУ Ана-



А.А. Павельев

толий Абрамович Павельев [1, 2]. Путем экспериментальных доказательств [3] и теоретических объяснений он отстаивал это перспективное направление в современной ракетной науке. Порой поражаешься находкам ученых. Ведь уран, да еще и фтор, эти два самых страшных элемента на Земле (разумеется, известных на сегодняшний день) могут дать соединение, которым возможно управлять без применения специальной организации процесса, специальных сооружений и средств защиты. Таких соединений известно в человеческой практике немного. Это фторопласт CF_4 , который является великолепным теплоизоляционным и прокладочным материалом. И это - элегаз, гексафторид серы SF_6 , единственный, пожалуй, материал, являющийся изолятором в электронно-лучевых пушках. А теперь еще и гексафторид урана.

Казалось бы, решены все проблемы после появления такого великолепного ТВЭЛа. Но, по законам философии начинаются другие. Это проблемы турбулентного массообмена. Ведь вдоль газообразного тяжелого ТВЭЛа течет тоже газообразный, но сверхлегкий водород. Ведь ему отдает гексафторид урана свою энтропию. Ведь именно его он нагревает до температур выше $3000^\circ C$. И поэтому от режима их совместного течения, двухслойного, стратифицированного течения, зависит эффективность теплообмена. Именно этим вопросом весьма предметно и основательно занимался Анатолий Абрамович Павельев. Его наследие - уникально.

После себя он оставил великолепный ядерно-струйный экзерцис [4] в виде фотографий различных струйных режимов (рис. 1-15), которые оказались бесценными в период разработки конструкций ЯРД. А также, являясь крупнейшим теоретиком, он оставил после себя большое творческое наследие в виде статей и книг.

Особенности работы газофазного реактора

Газодинамическая схема течения компонентов газового реактора достаточно проста. Она представлена в предыдущем номере журнала [3]. Здесь все организовано так, что цилиндрическая струя высоко-энтропийной плазмы с заданной скоростью вытекает из выходного устройства в рабочую зону. В этой зоне она соприкасается со спутным потоком водорода, который забирает значительную часть тепла, понижая существенно свою энтропию. Это высокoэнтропийное рабочее тело, ча-

ще всего водород, далее поступает на рабочие элементы двигательной установки. Если это - турбогенератор, то водород поступает на лопатки турбины и заставляет ее вращаться в целях выработки необходимой электрической энергии. Энергия после выпрямления тока или напрямую поступает в электроракетные двигатели для их питания и создания тяги.

В другом случае, водород поступает с высокой температурой в камеру жидкостного ракетного двигателя, где также его энергия утилизируется в кинетическую энергию тяги. Плазмообразный ТВЭЛ после отдачи своей энтальпии водороду, по замкнутому контуру вновь через теплообменник и сепаратор возвращается в рабочую зону. Такая простая на первый взгляд конструкция влечет за собой ряд серьезных проблем:

1. Проблема воспроизведения замкнутого термодинамического контура - типа Брайтона.
2. Проблема жаростойкости материалов жаровых подводных труб.
3. Проблема стойкости и жаростойкости крыльчаток высокооборотных насосов.
4. Проблема устойчивой работы газодинамического тракта рабочей зоны.

Последняя проблема является предметом настоящего рассмотрения. Другими словами, необходимо во время работы ядерной энергодвигательной установки управлять сильно стратифицированным потоком, стабильно удерживая в нем нужные рабочие параметры.

Предварительные исследования обозначили важную газодинамическую проблему создания устойчивых турбулентных стратифицированных течений при высоких сдвиговых параметрах.

Особенности стратифицированных течений

Стратифицированное течение отличается той особенностью, что в нем всегда присутствует послойное течение двух потоков, касательно взаимодействующих друг другом. Их взаимное трение приводит к появлению в этой области турбулентных течений. И в зависимости от разности параметров на их границе возникает тот или иной режим турбулентности [5]. Как было показано ранее [6, 7], стратифицированное турбулентное течение имеет несколько устойчивых конфигураций. При этом каждой предыдущей конфигурации соответствует более развитая последующая конфигурация в зоне перемежаемости (условно в области смешения спутных потоков).

Каждая последующая конфигурация является более сложной и тонко-организованной. Было показано, что в зависимости от величины сдвига потоков друг относительно друга ΔpV (кг/(м²·с)) на границе соприкасающихся потоков, реализуется то или иное стратифицированное течение, характеризующее режим турбулентности:

- при $\Delta pV < 1,9$ - ламинарный режим;
- при $1,9 < \Delta pV < 3,9$ - режим волн Толмина-Шлихтинга;
- при $3,9 < \Delta pV < 5,8$ - режим градиентных волн Кельвина-Гельмгольца;
- при $5,8 < \Delta pV$ - развитое турбулентное течение.

По-видимому, последний режим тоже имеет свою очень сложную когерентную структуру, но поскольку подобный вид течения является очень быстротекущим и мелкомасштабным, то современными методами диагностики не удаётся определить детально его высокодифференцированную структуру.

Процесс перехода от одного режима к другому сопровождается изменением размера струи. Очевидно, что самая компактная из них - ламинарная. Она самая спокойная и имеет параллельно расположенные линии тока. Но по мере усугубления течения появляется все больше и больше поперечных составляющих.

Их в просторечии называют поперечные пульсации, помятуя о введенном Осборном Рейнольдсом этого легендарного понятия. В последующем Людвиг Прандтль пытался материализовать это понятие, говоря о неких молях, движущихся из одного места случайно в другое. На самом деле это не моли. Это - либо вол-

ны, либо вихри. Строго говоря, под турбулентностью следует понимать вихревые течения ($\text{rot} \vec{V}$ или $\text{rot} \text{rot} \vec{V} \neq 0$). Волновые течения можно относить к переходным режимам.

Итак, поперечные потоки расширяют струю и чем дальше, тем струя толще. В такой постановке задача устойчивой работы ТВЭЛа сводится к организации минимального изменения размеров ТВЭЛа в процессе работы энергодвигательной установки. Другими словами, требуется создание условий, когда сопровождающие друг друга потоки водорода и гексафторида урана являются послойными и не воздействуют механически друг на друга.

Струйный экзерцис для ЯРД

Условие отсутствия механического воздействия потоков друг на друга сводится к созданию искусственного ламинарного потока, при котором общий профиль скорости на границе не имел бы скачков и имел бы конечную производную. В этом случае передача тепла от ТВЭЛа к рабочему телу будет осуществляться только посредством термо-молекулярной диффузии и радиационного теплообмена, а турбулентный теплообмен будет отсутствовать.

Очевидно, что создание таких условий предполагает применение специальных устройств, которые выравнивают потоки и приводят в соответствие сдвиговые параметры на линии их соприкосновения.

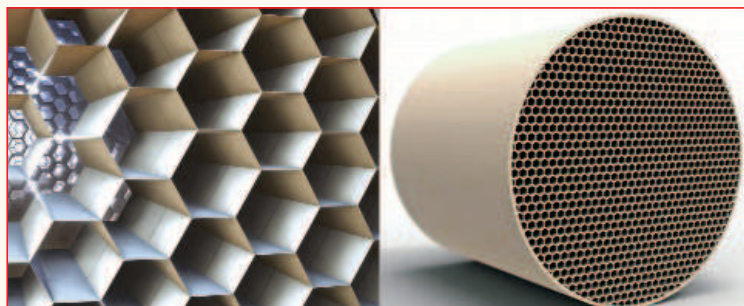
А.А. Павельевым были созданы специальные хонейкомбы [8], позволяющие управлять турбулентными потоками и создавать практически потенциальные пространственные течения на достаточно продолжительных участках с постоянными параметрами.

Устройство хонейкомбов представляет из себя большое количество склеенных между собой малоразмерных призматических или цилиндрических трубок, характерный проходной размер которых составляет величину порядка одного - двух миллиметров. Малый размер определяется высокой проницаемостью и низкой вязкостью водорода. Длина трубок и форма выходной части выбирались из условия получения заданного результирующего профиля скорости в потоке. Стенки трубок были минимальными в целях исключения донных эффектов. Многочисленные экспериментальные исследования, проведенные с использованием хонейкомбов, показали их высокую эффективность.

Конструкции хонейкомбов Павельева позволяли получать ламинарные течения искусственным способом. Ламинарность за хонейкомбами существенно отличалась от ламинарности в естественных условиях. Ламинарность Павельева представляла из себя поток, выстраивающийся в виде мелкомасштабных когерентных структур, искусственно созданных геометрией хонейкомбов. Это продольные жгутовые образования с малой длиной волны.

Подобное течение приближается к хаотическому, тепловому движению. Оно приближается к самому развитому турбулентному течению, к его последней конфигурации - к ламинарному течению. Известно, что самое развитое, самое бурлящее турбулентное течение - это ламинарное течение. Такое явление называют странным аттрактором. В этом случае размер вихря достигает своего предельного значения, равного числу Колмогорова [9]. Следующим шагом является превращение вихря в тепло.

Но чтобы получить все эти параметры по размерам ячеек хонейкомба, Павельеву пришлось проделать огромное число испы-



Компьютерное моделирование и внешний вид хонейкомба из керамических материалов

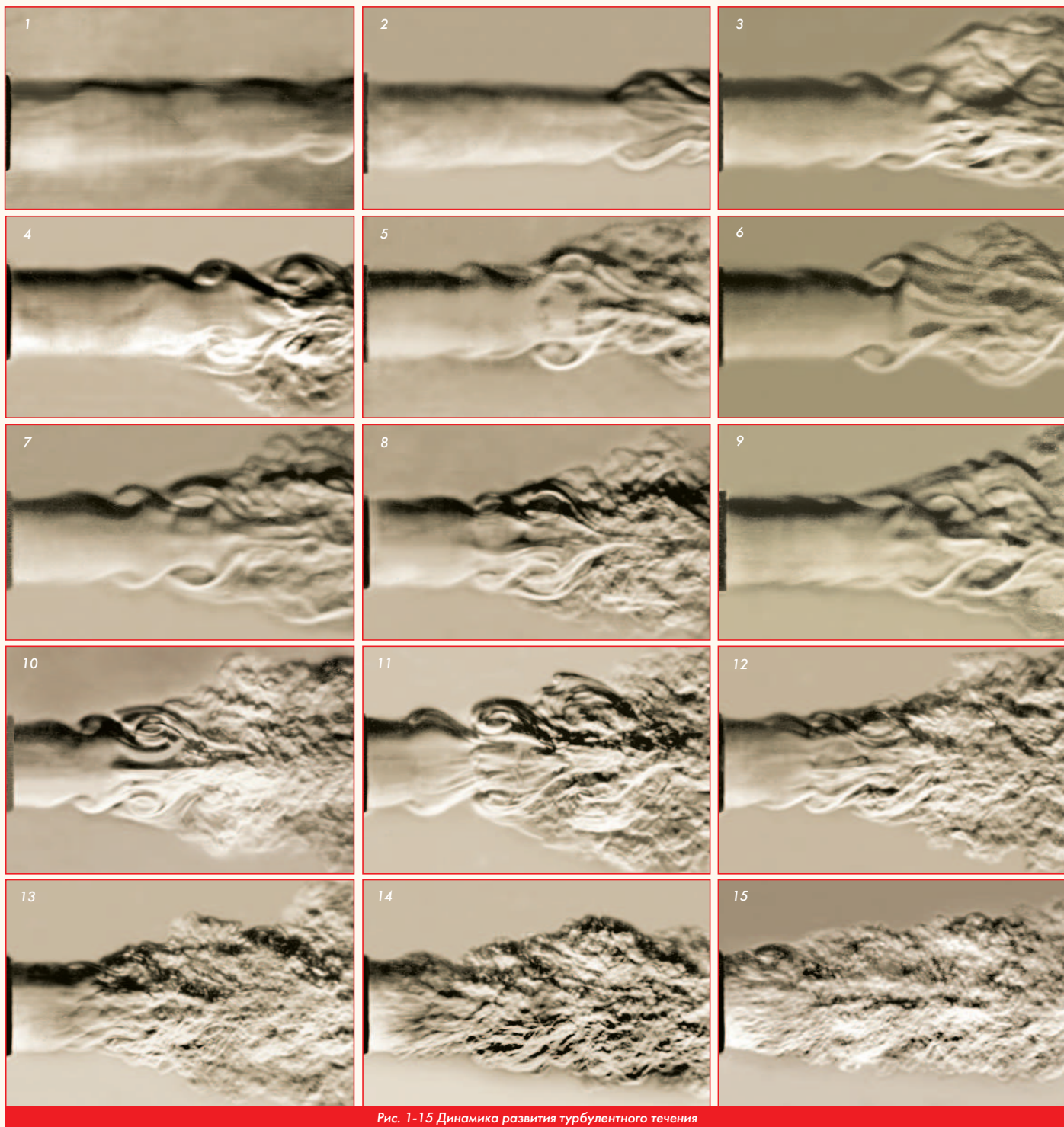


Рис. 1-15 Динамика развития турбулентного течения

таний, а точнее, большое крупномасштабное исследование по изучению режимов течения в спутных струях. Это - поистине великолепный научный экзерцис, который привел к новым логически понятным результатам и дополнительно представил турбулентность не как хаос, а как стройную конструкцию потока, устойчиво существующую при больших скоростях и импульсах.

На фотографиях (рис. 1-15) представлена динамика развития турбулентного течения в воздушной струе, истекающей в объем, заполненный гелием. Опыты были проведены А.А. Павельевым, а результаты были им любезно предоставлены автору для дальнейшей творческой деятельности. **П**

Литература

1. А.С. Коротеев, А.А. Павельев, А.И. Решмин и др. Ракетные двигатели и энергетические установки на основе газозофазного реактора // М. Машиностроение, 2002 г.
2. А.А. Павельев, Ю.Г. Демянко, Г.В. Конюхов и др. Ядерные ракетные двигатели // М. ООО "Норма-Информ", 2001 г.

3. Ю.М. Кочетков. Турбулентность в хонейкомбах. Течение Павельева // Двигатель № 5, 2007 г.

4. Ю.М. Кочетков, А.И. Бажанов. Турбулентность. Пространственный нестационарно-тепловой экзерцис ЖРДМТ // Двигатель № 1, 2020 г.

5. Ю.М. Кочетков. Турбулентность и математическое доказательство её невозможности в сверхзвуковом потоке // Двигатель № 3, 2018 г.

6. Ю.М. Кочетков, Н.Ю. Кочетков. Турбулентность в РДТТ. Разделительные линии // Двигатель № 4, 2012 г.

7. Ю.М. Кочетков. Турбулентность в ЯЭДУ // Двигатель № 5, 2010 г.

8. Ю.Г. Демянко, А.А. Павельев, Ю.М. Кочетков и др. 70 лет на передовых рубежах ракетно-космической техники // М. Машиностроение, 2003 г.

9. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Критические параметры вычислительной газодинамики // Двигатель № 3, 2019 г.

Связь с автором: swgeorgy@gmail.com