

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ.

ВИХРИ ТЕЙЛОРА-ГЁРТЛЕРА

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

Получены новые экспериментальные обобщения по течениям с вихрями Тейлора-Гёртлера. Объяснён механизм образования вихрей Тейлора-Гёртлера как возникновение бифуркации при ударе потока о стенку. На базе экспериментальных и теоретических заключений получены количественные соотношения для параметров течения Тейлора-Гёртлера.

New experimental generalizations of flows with Taylor-Gertler vortices are obtained. The mechanism of the formation of Taylor-Gertler vortices as the occurrence of bifurcation flow impact the wall is explained. On the basis of experimental and theoretical findings the quantitative relations for the Taylor-Gertler flow parameters are found.

Ключевые слова: турбулентность, вихри, волны.

Keywords: turbulence, vortices, waves.

При усугублении условий течения в движущемся потоке с некоторого момента возникают пространственные конфигурации, которые могут быть объяснены всей предыдущей логикой рассуждений о постепенном переходе к турбулентному (вихревому) течению. Да, действительно, всё возрастающее число Рейнольдса говорит о том, что увеличивается скоростной напор. Любые препятствия, стоящие на его пути всё меньше и меньше "чувствуют" его приближение, что всё чаще и чаще приводит к, так называемым, отрывам. Вязкость уже не "справляется" со сглаживанием возникающих "случайных" возмущений. Ведь она фактически падает. Наступает момент, когда турбулентность начинает проявляться в полной мере. Главным параметром в этих условиях выступает уже не скорость $\bar{V}$, а её высокодифференцированная комбинация $\text{rot } \bar{V}$. Другими словами в потоке всё чаще появляются вихревые поля. В экспериментах это наблюдается в местах, где контур канала не гладкий, а имеет выступы, уступы, преграды и застойные зоны.

Как правило, в этих областях резко поднимается давление $dp/dx > 0$, то есть присутствует положительный градиент давления. Но не только положительный градиент давления провоцирует "отрывные зоны" и вихри. Как было показано в работе [1] даже в гладком безградиентном канале (пластина или труба) могут возникнуть пространственные потоки с образованием вихревых и даже торсионных структур (о последних позже). Почему это происходит? А потому, что с увеличением скоростного напора (Re) происходит закономерный переход к турбулентности. Изначально ламинарное течение под воздействием этого параметра и в соответствии с числом Рейнольдса превращается в течение с волнами Толмина-Шлихтинга. Затем волны Толмина-Шлихтинга превращаются в градиентные волны Кельвина-Гельмгольца и достигают своей предельной конфигурации - накрывной волны (градиентная катастрофа), с поверхности которой под большим углом к стенке обрушивается следующая над ней лавина со своими линиями тока. Эта лавина ударяется о поверхность стенки и превращается в пространственный закрученный поток. В этот момент уже можно говорить о начале турбулентности. Подробнее о разрушении этого потока будет сказано ниже, но уже сейчас следует отметить, что одним из параметров разрушения будет положительный градиент давления. Таким образом, природа образований трёхмерных вихревых структур и при отрывах за уступами-выступами, и в области за последней градиентной волной одна и та же.

С чего всё началось

По-видимому, всё началось с желания повторить эксперименты Куэтта с потоком между двумя параллельными плоскими стенками, одна из которых могла совершать движения относительно другой. Но при этом две параллельные плоскости захотелось изменить на два коаксиальных цилиндра, вращающихся один относительно другого. Впервые такие течения вязкой жидкости экспериментально исследовал замечательный английский физик-океанограф, в будущем член Лондонского Королевского Общества, Джеффри Инграм



Джеффри Инграм Тейлор

Тейлор. Большую часть своей творческой деятельности он посвятил разработке теории турбулентности и развил свою собственную теорию устойчивости течения вязкой жидкости. Но! Главная заслуга этого учёного - открытие по сути невероятного эффекта - его знаменитых вихрей Тейлора. Этот эффект лежит в основе прочного, монолитного фундамента знаний всей газовой динамики и особенно теории турбулентности. Своими экспериментами он показал красоту и неисчерпаемость этой великой науки. Украсил её неформальными и нетривиальными составляющими нетленной библиотеки гносеологических фактов. Можно только представить ту бурную реакцию, которую произвели среди исследователей полученные им результаты. Многие учёные, судя по их многочисленным публикациям тех лет, буквально вцепились в эту проблематику. Начали появляться новые эксперименты и теории. На рис. 1 представлено изображение вихрей Тейлора между двумя прозрачными коаксиальными цилиндрами. Здесь чётко видны тороидальные вихри, заполняющие равномерно всё пространство между цилиндрами. Вращение соседних вихрей происходит в противоположном направлении и представляет собой естественные пары с образованием линий стекания и растекания на границах контакта.

Вторым открытием, которое было сделано под впечатлением опытов Тейлора, было замечательное открытие вихрей Генри Гёртлером. Этот известный канадский учёный, будучи крупным математиком и специалистом по теоретической физике, теоретически с помощью метода малых колебаний предсказал подобные вихри, которые могут образовываться на вогнутых поверхностях. Им было показано, что потоки вдоль выпуклых поверхностей всегда стабилизируются, а на вогнутых, под воздействием центробежных сил, они теряют устойчивость. Гёртлер провёл исследование и доказал, что процесс обтекания вогнутых поверхностей является сходным с процессом, происходящим между вращающимися цилиндрами, и обладает универсальным свойством. И справедливо принято в газодинамической науке называть продольные вихри вдоль вогнутых стенок вихрями Тейлора-Гёртлера.



Рис. 1 Вихри Тейлора



Генри Гёртлер

По своей значимости это открытие равносильно таким великолепным открытиям как волны Толмина-Шлихтинга, Кельвина-Гельмгольца и Бенара. Именно эти последние открытия легли в основу современной теории турбулентности.

Правильным было бы отметить, что вихри Тейлора-Гёртлера были предсказаны теоретически. Гёртлер, располагая данными эксперимента Тейлора, поставил математическую задачу на собственные значения. При этом, в отличие от Толмина, который решал задачу о волновом течении так же методом малых колебаний,

Гёртлер расположил основное течение в направлении продольной оси (x) и распределил остальные две координаты перпендикулярно стенке (y) и поперёк течению в плоскости стенки (z), что дало ему возможность задать трёхмерные возмущения u' , v' и w' . Эти возмущения он специально задал периодическими [2]. То есть его будущие решения уже предполагали цикличность и возможность появления вихрей. Следует также отметить, что этот метод базируется на том, что при малых отклонениях, то есть в условиях пропорциональности Гаука, всё сохраняется. И действительно, в постановке Гёртлера всё сохранилось. Он получил желаемый результат. Но в своей теории уважаемый Генри Гёртлер, к сожалению, ничего не сказал о механизме образования вихрей, которые носят его имя, это он оставил для благодарных потомков. В дальнейшем теория Гёртлера была блестяще подтверждена экспериментально. Были действительно получены продольные парные вихри на криволинейных поверхностях, и была показана справедливость критериев Тейлора Ta и Гёртлера $Gö$ (по своей структуре они похожи), по значениям которых можно было предсказывать возможность наступления, так называемой, неустойчивости в ламинарном потоке.

Появление вихрей Тейлора-Гёртлера является самым началом турбулентного течения. Возникновение такого течения может произойти и без переходного периода при наличии необходимых условий. При этом ламинарное течение может скачкообразно перейти в турбулентное, например, за уступом. Дальнейшее развитие турбулентности будет зависеть как от условий вблизи стенок канала, так и от формы канала, по которому движется жидкость, газ или плазма.

Целевые экспериментальные исследования

Криволинейные поверхности для внутренних течений в каналах лучше всего моделировать на соплах. Для задания формы этих поверхностей удобнее всего воспользоваться свойствами самого процесса, а именно, процесса разгара внутренней части сопла, после которого и формируется известная кривизна. При исследовании разгаров различных сопел РДТТ был использован метод уноса массы. Этот метод основан на линейной закономерности процессов пиролиза полимерных уносимых материалов. В качестве базового материала после многочисленных проб был выбран фторопласт. Этот материал в отличие от других полимеров, например, полиметилметакрилата, не плавился при его догорании после запуска. Фторопласт просто сублимировал, а сам процесс сублимации резко оставался после прекращения горения твёрдого топлива.

Метод уноса массы был известен и ранее, но в отличие от предыдущих работ он был использован в составе РДТТ. Большим преимуществом в данном случае является собственно процесс горения заряда. Начало и конец горения в отличие, например, от ЖРД, в РДТТ происходит практически скачкообразно: пушечный запуск в начале и резкое падение давления после сгорания заряда. Таким образом, циклограмма запуска имеет строго прямоугольную форму с вертикальными линиями запуска и спада и строго горизонтальной линией на рабочем участке. Эти два фактора (фторопласт +

РДТТ) позволили в дальнейшем получать отпечатки на стенке от воздействия газового потока с чёткими границами, подчёркивающими его особенности. В ЖРД и на воздушных установках с подогревом зачастую следы от краёв пересекающихся и смежных потоков имели закруглённый, оплавленный вид.

Для простоты исследования были выбраны конические сверхзвуковые сопла из фторопласта. Дозвуковая часть сопла была неразгораемой и выполнялась из тугоплавкого сплава. Сопла подвергались циклическому воздействию высокоэнтальпийных продуктов сгорания натуральных РДТТ с целью определения динамики разгара. Исследовались сопла в условиях продуктов сгорания металлизированных (18 % Al) смесевых твёрдых топлив и безметалльных топлив (БТ). Рассматривались конические сопла с полууглами наклона в диапазоне от 0° до 60° .

На рис. 2 представлены подробные изменения по времени геометрии внутренних поверхностей конических сопел после запуска с различными полууглами наклона образующих к оси для различных видов топлив. Было установлено [3]:

1. С увеличением угла раскрытия конического сопла уносы уменьшаются, а при угле 65° и более они уже отсутствуют;

2. Максимум уносов для всех экспериментов лежит строго на прямой, и был аппроксимирован зависимостью

$$\frac{\delta_{\max}}{S_{\max}} = 0,525 - 0,25 \lg \theta_{\text{вх}}$$

где $\delta_{\max}$ и $S_{\max}$ максимальное значение линейного уноса и его местоположение;

3. Безразмерная зависимость имеет универсальный вид для любых топлив, материалов сопла (проводилось обобщение натуральных двигателей) и полууглов наклона входной части $\theta_{\text{вх}}$

$$\frac{\delta}{\delta_{\max}} = \sin \frac{\pi}{2} \frac{S}{S_{\max}};$$

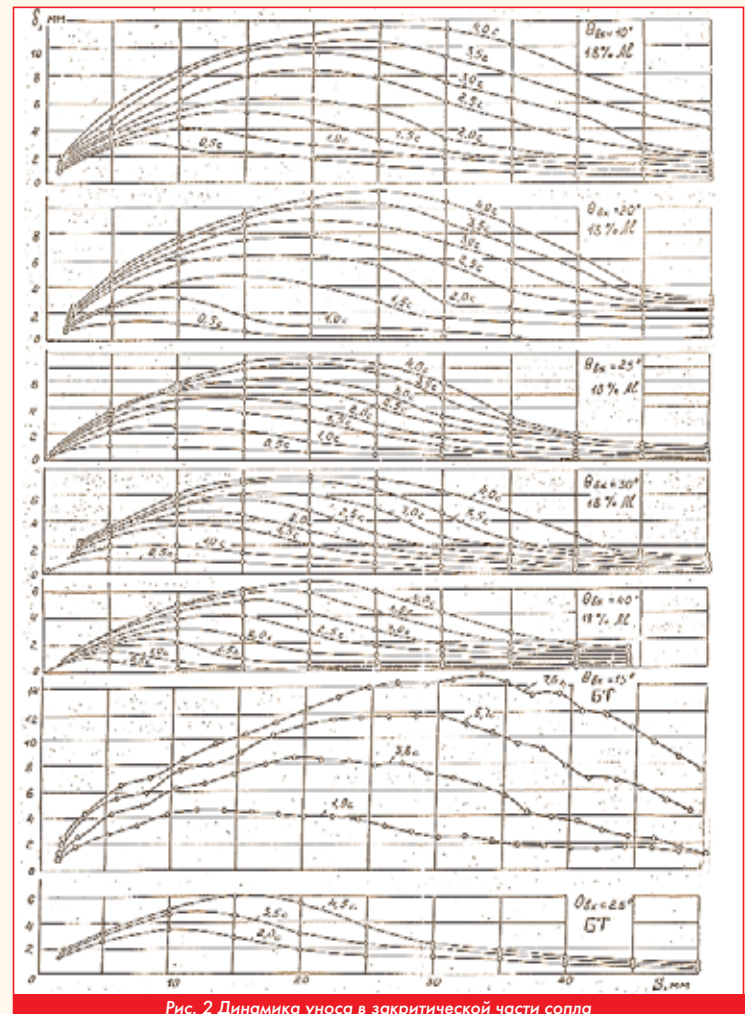


Рис. 2 Динамика уноса в закритической части сопла

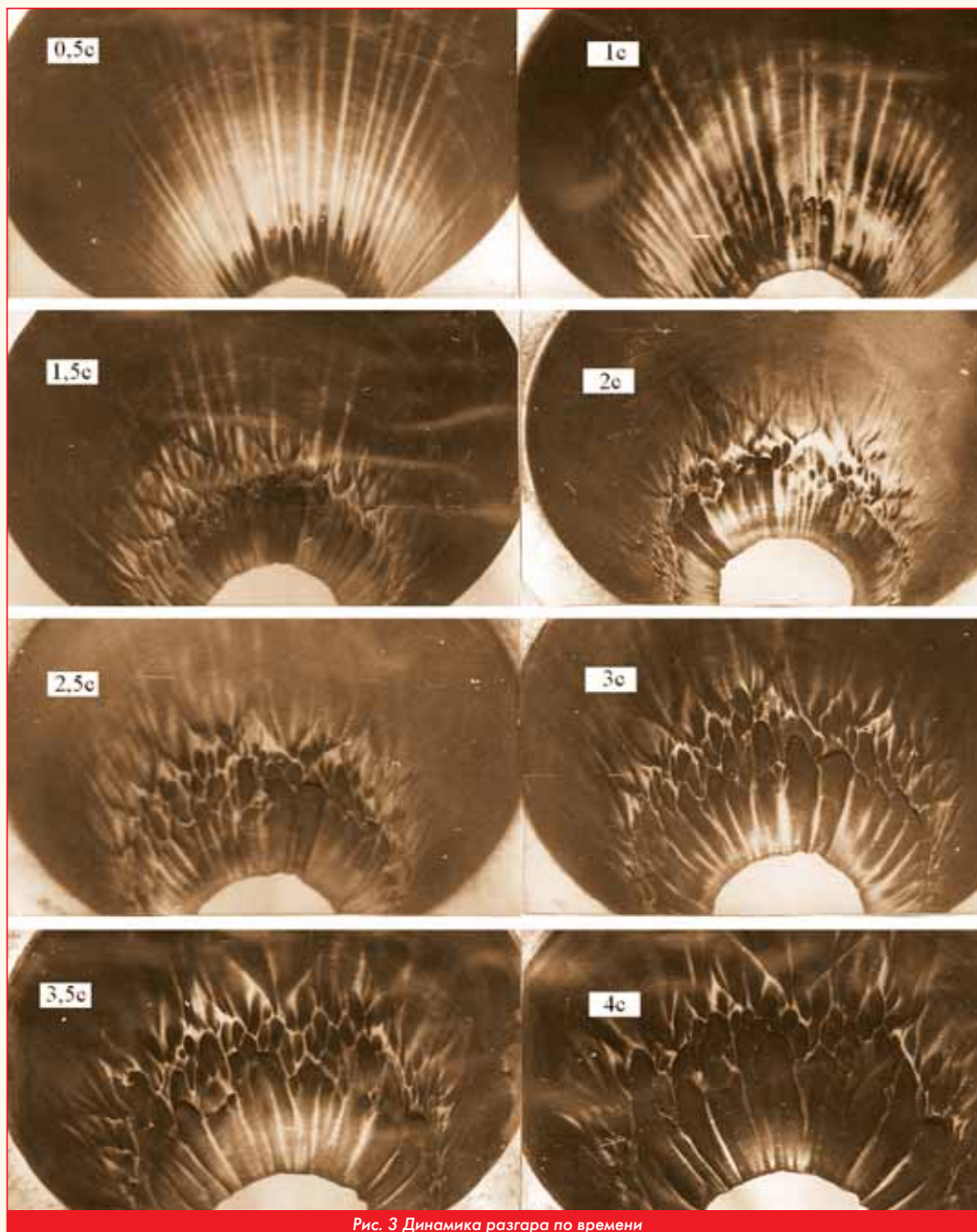


Рис. 3 Динамика разгара по времени

4. Образовавшиеся в закритической части сопел цилиндрические борозды - следы вихрей Тейлора-Гёртлера (рис. 3) - по размерам практически совпадали с величиной максимального уноса. Очевидно, что в этой области реализуется максимальный положительный градиент давления. При этом справедливо соотношение $\lambda = 2d \approx 2\delta_{\text{ун max}}$, где буквенные выражения в формулах соответственно обозначают размер парного вихря, размер единичного вихря и максимальное значение уноса.

О возникновении дискретных вихрей

Проведенные опыты по исследованию уносов фторопластовых сопел и эмпирические обобщения на их базе позволяют обосновать причину возникновения парных продольных вихрей Тейлора-Гёртлера и математически представить основные параметры в виде конечных зависимостей. Прежде всего, поймём, почему возникают продольные вихри. Для этого рассмотрим схему течения. А она такова: поток натекает на образовавшуюся в процессе разгара ямку в закритической области сопла. Ямка имеет определённую и известную из предыдущего анализа кривизну. То есть поток под углом

$$\Delta\theta = \arctg \frac{\delta_{\text{max}}}{S_{\text{max}}}$$

натекает в районе максимального уноса на стенку. Ударяясь о стенку, поток раздваивается, происходит бифуркация. При этом он направляется влево и вправо вдоль окружности. Но! Такую же ситуацию можно нарисовать и для любой другой образующей, стоящей, например, в непосредственной близости от первоначальной, и на значительном расстоянии от неё. Как и когда эти потоки могут сбалансироваться? Какой параметр ограничит их продвижение? Кто победит в этой схватке? И здесь следует обратить внимание на опыты Тейлора с цилиндрами. Почему там не возникает такая ситуация? А потому, что в опытах Тейлора присутствует некий характерный размер - ширина щели между цилиндрами. Этот размер уравнивает конкурирующие потоки и укладывает их в равноценные тороидальные вихри одного размера.

В ситуации вихрей Тейлора-Гёртлера таким ограничителем служит величина максимального уноса. Недаром она по размеру совпадает с диаметром единичного вихря. Именно этот размер $\delta_{\text{ун max}}$ явился третьей стороной в споре за пространство вблизи стенки. Почему именно этот размер является характерным? Потому что он является той "щелью между цилиндрами", которая ограничена линией разгара и линией тока безградиентного потока, то есть линией первоначального контура.

Теперь о количественной стороне данного вопроса. Продифференцируем дважды зависи-

мость функции уноса вдоль образующей контура сопла

$$\delta'' = - \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \frac{\delta}{S_{\text{max}}^2}.$$

Вспомянув о радиусе кривизны и размере парного вихря, для условий в точке максимума получаем

$$\frac{\lambda}{R_{\text{max}}} = -\pi^2 \frac{\rho V_{\text{L}}^2}{2R_{\text{max}}} \cdot \frac{R_{\text{max}}}{\rho V_{\text{II}}^2}.$$

В последнем соотношении была сконструирована некоторая структура путём домножения числителя и знаменателя на плотность продуктов истечения и представления $\text{tg } \Delta\theta$ в виде отношения нормальной и продольной скоростей газового потока $\text{tg } \Delta\theta = V_{\text{L}}/V_{\text{II}}$. В таком виде сразу в знаменателе просматривается центробежная сила, а числителе некий градиент давления. По-видимому, не теряя общности в рассуждении, можно записать зависимость в следующем виде с учётом знака кривизны

$$\frac{\lambda}{R_{\text{max}}} \sim \pi^2 \cdot \frac{dr}{F_{\text{цб}}},$$

где dp/dr и $F_{\text{цб}}$ - градиент давления и величина центробежной силы, действующей на частицы в потоке.

Эксперименты, иллюстрирующие вихри Тейлора-Гёртлера

Имеющиеся в доступной литературе экспериментальные факты, в основном в виде фотографий, полученных в результате воздушных продувок с помощью сажемасляных покрытий, либо отпечатков на полиметилметакрилате, или зафиксированных после натурных испытаний на поверхностях сопел, к сожалению, представлены в большинстве своем в виде нечётких и неоднозначных изображений. Они часто не позволяют напрямую идентифицировать особенности течений, например, наличие следов от вихрей. Так, например, в работе Ингера представленные фотографии не дают основания однозначно предполагать, что течение, исследуемое в данной работе, периодическое. В работе Жину представлены фотографии с продольными бороздами, но комментарии, сделанные по ним в части присутствия периодических течений не являются убедительными. В работе В.Н. Бражко представлены фотографии со следами, имеющими периодически расположенные борозды, но говорить о том, что это следы продольных вихрей не представляется возможным. Весьма основательной и скрупулёзной является работа Г.Ф. Глотова и Э.К. Мороза [4]. Фотографии, приведённые в

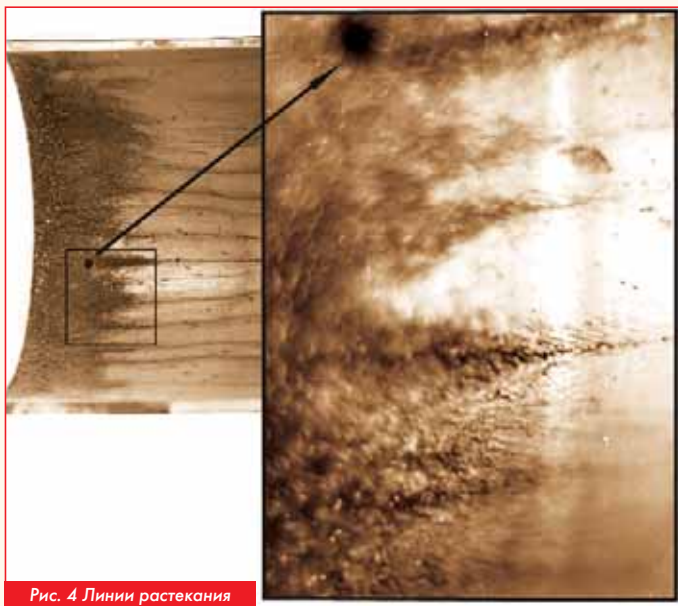


Рис. 4 Линии растекания

этой работе, фиксируют области присоединения оторвавшегося от уступа воздушного вихревого потока и седловые точки, выделяющие из общего потока линии растекания. Аналогичные опыты были в точности повторены К.П. Жуковым и В.В. Мироновым (рис. 4). Ими также были обработаны результаты экспериментов в зависимости от критерия Рейнольдса, построенного по высоте уступа. На рис. 5 приведена фотография из работы [5], полученная при исследовании разгаров сверхзвуковой проточной части натурального РДТТ. Авторами была зафиксирована трехмерная картина уносов в виде продольных периодически расположенных борозд на криволинейной поверхности — следов вихрей Тейлора-Гёртлера. В качестве уносимого материала использовался углепластик (УП). В критическом сечении был установлен тугоплавкий сплав (ТС), а за критикой — пирографит (ПГ).



Рис. 5 Вихри Тейлора-Гёртлера на фрагменте натурального сопла

На рис. 6 представлена фотография испытания твердотопливного ускорителя РН "Титан IV", на периметре среза струи видны вихри Тейлора-Гёртлера, сформировавшиеся за местом стыковки деталей сверхзвукового сопла. Аналогичная картина наблюдается и при работе различных ЖРД, в т.ч. J-2 РН "Са-турн-V" (рис. 7).



Рис. 6 Вихри Тейлора-Гёртлера на срезе сопла РДТТ

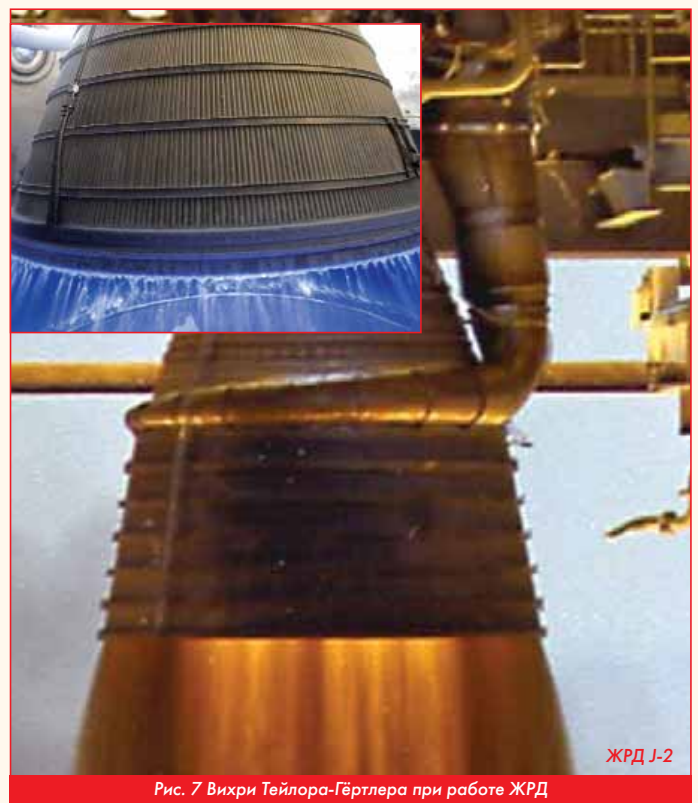


Рис. 7 Вихри Тейлора-Гёртлера при работе ЖРД

Литература

1. Ю.М. Кочетков. Турбулентность без градиентов. // Двигатель № 5, 2006 г.
2. Г. Шлихтинг. Теория пограничного слоя. М. Наука, 1974 г.
3. Ю.М. Кочетков. Влияние величины входного угла сверхзвукового контура на разгар сопла РДТТ. // Двигатель № 6, 2003 г.
4. Г.Ф. Глов, Э.К. Мороз. Продольные вихри в сверхзвуковых течениях с отрывными зонами. // Учёные записки ЦАГИ, том VIII, № 4, 1977 г.
5. А.В. Мезенцев, В.И. Смыслов, В.И. Хоничев. Периодическая структура массообмена на аблирующей поверхности в сверхзвуковой части сопел. // Тепло массообмен, том 3, Минск, 1984 г.

Связь с автором: swgeorgy@gmail.com