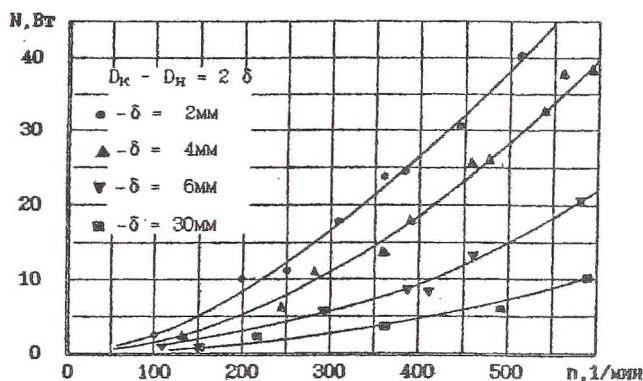


Так приведенные на рис.4 расчетные и экспериментальные данные по мощности гидравлических потерь свидетельствуют о возможности использования "метода тройников" при определении гидropотерь в камере гидропривода сильфона.

Рис.4. Мощность гидравлических потерь в камере гидропривода



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. / Под ред. М.О. Штейнберга. - М.: Машиностроение, 1992. - 672с.
- Довгялло А.И., Докторов О.Ю. Экспериментальная методика определения гидropотерь при работе складывающегося мембранного сильфона в гидравлической камере. // Проблемы и перспективы развития двигателестроения. - Самара, СГАУ, - 1998. - Вып.2, 4-2, с. 220-223.

\*УДК 621.45.03: 532.533.697.7.3: 534.115: 534.134: 532.527.

## О ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ПОТОКА ГАЗА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Еланчик Ф.И.

ОАО СНТК им. Н.Д.Кузнецова, г. Самара

Данная работа посвящена анализу определенного вида колебаний потока воздуха в головке камеры сгорания ГТД. Реализация этих колебаний ведет к изменению гидравлического сопротивления ( $\sim 2\%$  давления), изменению отношения расходов воздуха (местных), подаваемого на горение и подмешивание (в среднем, например, на 0,25, максимальное относительное изменение

этого числа (по сравнению с расчетным) при этом составляет 1,5 на каждом периоде колебаний). Следствием данных колебаний является окружающая неравномерность температуры перед турбиной. В то же время распознавание и прогноз колебаний данного вида связаны с преодолением трудностей. Их частота ( $\sim 200$  Гц) оказывается за пределами частотных диапазонов применения измерителей температуры продуктов сгорания. Размах колебаний статического давления перед форсунками имеет порядок 1 %, т.е. для отдельных датчиков он не превышает уровня шума. Колебаний практически нет (либо ничтожно малы их интегральные результаты) в лабораторных установках для испытания камеры сгорания. Они могут проявляться лишь в таких камерах сгорания, конструкции которых содержат отличия, способствующие гашению колебаний некоторых других видов. Изменения конструкции ГТД, ведущие к наличию самопроизвольных колебаний данного вида, определяют свойства потока газа, проявляющиеся как нелинейные, с запаздыванием, немонотонными усиливающими переходами (характерными для “динамического хаоса”), и потому затруднителен прогноз колебаний.

Результаты данной работы получены путем анализа решения уравнений Навье-Стокса (аналогичных уравнениям ламинарного течения), замыкаемых с помощью уравнений энергии и состояния газа, а также (равносильных уравнениям Навье-Стокса) соотношений симметрии, доопределяющих соответствие между граничными параметрами реализации “турбулентных всплесков”. Экспериментальная проверка состоит в проверке рассчитанных изменений интегральных стационарных параметров, в сопоставлении теоретического описания и результатов визуализации потока в моделях (например, в условиях гидродатчика), в проверке эффективности мероприятий по коррекции процесса, выработанных на основе данного анализа, в проведении замеров статического и полного давления газа, подтверждающих нетривиальные факты отрыва потока от стенок газового тракта камеры сгорания. Уравнения течения газа решаются с граничными условиями “непротекания” и “прилипания”, соответствующими конструкции камеры сгорания. Границы области анализа со стороны компрессора и выхода камеры сгорания определялись в ходе исследования, причем, в качестве условий, обеспечивающих практическое применение результата, выбраны со стороны входа - задание постоянного расхода воздуха через каждый межлопаточный канал последнего направляющего аппарата компрессора, со стороны выхода - задание постоянного

статического давления в жаровой части. Для условий лаборатории задавалось постоянное полное давление воздуха на входе.

При решении краевых задач вместо "моделей турбулентности" (в виде формул для турбулентной вязкости, общих формул для пути турбулентного перемешивания и пр., часто применяемых в практике ведения "пробных" расчетов) в данной работе применяются результаты анализа видов "турбулентных всплесков", получаемых в указанных выше предпосылках. Весь поток представляется в виде сочетания этих "всплесков" и областей гладкого маловязкого течения. "Турбулентный всплеск" определяется глобальными характеристиками поля скоростей - наличием "неоднородной седловидности" этого поля (нарушения монотонности эшоры с перегибом), монотонности поля в окрестности места "неоднородной седловидности", условиями развития "седловидности" в поле сил давления и вязкости.

Исследования отдельного "всплеска" основаны на анализе известного состояния неустойчивости Кельвина - Гельмгольца для маловязкого потока с разрывом скорости, совпадающим с линией тока. Особенностью использованного пути анализа этой неустойчивости является учет вязкости потока и определение на основе этого учета однозначной (или примерно однозначной) последовательности качественных и количественных изменений в изучаемом потоке. Кроме того рассматриваются стабильные местные изменения направления потока, характерные для границ начальных участков струй (закрутка вихрей под воздействием сил вязкости и вторичных сил давления).

Результатом "всплеска" является отрыв турбулентных молей от первоначально гладких трубок тока, распад и восстановление этих трубок. "Глобальные всплески", ведущие к выделению относительно крупных молей, являются результатом увеличения эффективной турбулентной вязкости вследствие реализации более мелких "всплесков". С другой стороны в окрестности границ крупных молей происходят более мелкие "всплески". Для турбулентного потока со стационарными осредненными свойствами характерны относительно большие расстояния между "всплесками", стандартизация их осредненных характеристик. Это обстоятельство наряду с каскадом методов рационализации и упрощающей аппроксимации применяется при анализе конкретного потока. Такой подход оказывается эффективным по крайней мере при анализе потоков жидкости и газа, взаимодействующих с твердыми телами в технических устройствах при дозвуковых, трансзвуковых



скоростях и при давлениях порядка нормального атмосферного (в то время как решение задач метеорологии, океанологии, задач о гиперзвуковом движении аппаратов, о движении в вакууме должны решаться с большим применением традиционных статистических методов).

Замечание. В случаях весьма сложной вихревой структуры течения применение данного подхода не избавляет от использования (по крайней мере на промежуточных этапах исследования) игровых экстраполяционных упрощений задания. Полуэмпирические методы - частный случай таких упрощений. Отличие данного подхода - учет (на этапе доводки решения физических проблем и практической постановки задачи) конкретных условий, выражаемых не только с помощью классификации конструкций, но и классификации пространственно-временных областей со свободными границами - областей именно гидроаэродинамической турбулентности. Такая классификация включает условия реализации турбулентных “всплесков” и разрывов. Результат любого частичного исследования может быть уточнен путем более полного описания структур течения. Однако и в простейшем варианте такой результат обладает преимуществом корректности по сравнению с результатами работы по ряду существующих полуэмпирических методов.

Результаты анализа приведем для случая классической кольцевой конструкции камеры сгорания с “мелкофорсуночной” головкой, с разделением расхода воздуха на подаваемый на горение и подмешивание к продуктам сгорания, с применением носика жаровой части для подпора течения в диффузоре, с коническим диффузором и с подачей части воздуха в середину жаровой трубы через отверстия в носике жаровой части.

В таблице 1 приведены параметры, существенно влияющие на колебания, и значения этих параметров, для которых далее приведены результаты анализа. Под относительной площадью каждый раз понимаем отношение данной площади к площади поперечного сечения на входе в диффузор. Под относительным размером - отношение данного размера к радиальному размеру канала входа в диффузор.

В исследуемых случаях колебания воздуха в головке носят объемный характер. Это означает, что с одной стороны движение воздуха в какой-либо плоскости нельзя свести к одномерному, с другой стороны даже течение в различных плоскостях симметрии - продольных диаметральных плоскостях лишь формально может быть синхронным, но фактически синхронное тече-

Таблица 1.

Название параметра	Диапазон значений
<b>Относительная площадь:</b>	
боковой поверхности диффузора	3 ... 6
выхода диффузора	1,3 ... 1,5
суммы поперечных сечений каналов форсунок	0,6 ... 1
суммы поперечных сечений каналов подмешивания	0,6 ... 1
<b>Относительный размер:</b>	
Суммарная толщина вытеснения пограничного слоя у стенок	0,1 ... 0,2
Тракта на выходе диффузора	
между срезом диффузора и стенкой жаровой трубы	2 ... 3
толщина носика жаровой трубы	0,1 ... 0,7
длина носика жаровой трубы	1,5 ... 3
расстояние от носика жаровой трубы до оси форсунки	1 ... 2
длина головки	3 ... 4,5
радиальный размер головки	2 ... 3
радиальный размер между оболочкой и жаровой трубой	0,75 ... 1,5
длина контура жаровой трубы между носиком и местом подмешивания	4 ... 7

ние должно быть неустойчивым, так что в разных таких плоскостях колебания должны иметь разную фазу. При этом связь между процессами, происходящими в разных таких плоскостях, является максимальной не только в областях максимального изменения статического давления (на входах в диффузор), но и в областях с максимальными перетоками при малых перепадах давления - в широких частях головки после диффузора. Однако, в камере сгорания, выполненной (если не принимать во внимание дискретность форсунок и патрубков подмешивания, масштабы которой весьма малы по сравнению с размерами области колебаний) в виде тела вращения при осевом направлении течения на входе и наличии свойств аналогичной осевой симметрии в конструкции прилегающих узлов, "затравкой" процессов являются процессы в осевой диаметральной плоскости. Опишем эти процессы качественно. За начальное состояние принимаем состояние безотрывного потока в широкой части головки. В этом состоянии отношение расходов воздуха на горение и перемешивание имеет значение порядка 1. Гидравлическое сопротивление течению определяется исключительно потерями полного давления

на входе и выходе форсунок при осевом входе потока. Статическое давление в головке близко к заторможенному давлению на выходе компрессора при расчетном постоянном расходе воздуха и данном числе оборотов ротора и отличается от давления в камере сгорания на величину потерь давления в форсунках.

Данное состояние не может быть стационарным, ввиду срывного характера потока в диффузоре при толстых пограничных слоях и ввиду внезапного расширения потока на выходе диффузора. Циркуляционная зона, которую с приближением можно считать застойной, монотонно развивается, “прижимая” поток к стенке жаровой части и приближаясь к состоянию, когда распределение скорости по длине струи выравнивается. В этот момент поток газа на входе в форсунку не занимает всего сечения, его скорость повышается даже по сравнению со скоростью потока на входе в диффузор. Потери полного давления в форсунках и патрубках подмешивания повышаются. При этом не только полное давление за компрессором, но и статическое давление в головке несколько повышается (это следует из повышения скорости в трубке подмешивания). Расход воздуха на подмешивание больше, чем на горение. Температура горения повышается.

В условиях неравномерности кривизны свободной границы струи у носика передней стенки жаровой трубы такое состояние также не является стационарным. В зоне поворота действуют “всасывающие силы”, ведущие к ускорению перемешивания струи и застойной зоны, возрастает гидравлическое сопротивление. Причина процесс, аналогичный развитию неустойчивости Кельвина - Гельмгольца. Основная струя меняет направление, разветвляется. Возникает “двухмерная” нестабильная система вихрей. Аналогичные процессы “стополят” струю воздуха в направлении патрубков подмешивания. В то же время сопротивление потоку на входе в форсунку уменьшается из-за изменения направления потока - его приближения к направлению оси форсунки. Статическое давление на входе в форсунку падает, и туда “втягивается” струя газа со стороны диффузора, “обрамленная” множеством циркуляционных зон и включающая такие зоны. В этой фазе сопротивление газовому потоку в головке оказывается повышенным за счёт перемешивания струи за выходом диффузора с застойными зонами. В то же время отношение расходов воздуха на подмешивание и на горение оказывается пониженным по сравнению с исходным состоянием вследствие потерь энергии струи, ответвляю-



щейся от исходного потока в сторону патрубков подмешивания при следовании этой струи вдоль поверхности жаровой трубы и перемешивании струи с застойной зоной. Данное отношение расходов близко к нулю (мало по сравнению с 1), при отношении площади поперечного сечения струи перед форсунками к площади поперечного сечения воздушных каналов форсунок не превышающем 1. Между тем данное отношение площадей увеличивается в два раза за счет перемешивания струи с застойной зоной.

В данной фазе процесса зона повышенного статического давления в головке расположена непосредственно вблизи выхода диффузора, внутри же "широкой" части головки располагается множество циркуляционных зон ("вихрей"), размеры которых не превышают поперечный размер диффузора на выходе. При этом реализуются тенденции как расширения струи в направлении по потоку, так и уменьшения максимальной кривизны "средней линии", условно характеризующей направление струи. Несмотря на это "средняя линия" остается криволинейной, содержит перегиб. Это ведет к распаду струи с формированием циркуляционных зон, размеры которых имеют порядок половины расстояния от среза диффузора до форсунок. В этом случае зона повышенного статического давления перед системой "вихрей" принимает размеры, превышающие поперечные размеры диффузора. Такое давление воздействует на область потока, прилегающую к оболочке камеры сгорания, в результате чего восстанавливается исходное состояние. Таким образом существует незатухающий процесс колебаний потока воздуха в головке. В этом процессе терпят изменения гидравлическое сопротивление головки и соотношение расходов воздуха, подаваемого в камеру сгорания на горение и подмешивание к продуктам сгорания. Колебания обоих этих параметров сдвинуты друг относительно друга по фазе.

Дополнительные потери полного давления колеблются от нуля до величины порядка скоростного напора в диффузоре. Отрыв потока от стенок диффузора на входе в головку оказывает дополнительное количественное влияние на рассматриваемые изменения и, в частности, ведет к увеличению гидравлических потерь.

Как правило, при проектировании диффузора обеспечивается безотрывность течения в условиях практического отсутствия пограничного слоя на входе. При этом, однако, для безотрывного потока отношение падения (относительного) скорости в диффузоре (с одной стороны) и отношения длины

диффузора к радиальному размеру входа (с другой стороны) является ограниченным. Расчет и эксперименты показывают, что толщина пограничного слоя у стенок тракта на входе в диффузор оказывает весьма существенное влияние на это ограничение. Сам по себе отрыв потока от стенок диффузора, как известно, не является стационарным.

Описанные изменения характеризуются сохранением постоянного суммарного расхода воздуха на горение и подмешивание. Они должны реализоваться при синхронности изменений в разных продольных диаметральных плоскостях камеры сгорания, в отсутствие окружных неравномерностей. Для выяснения причин окружных неравномерностей температуры на выходе камеры сгорания, оценки реальных амплитуд колебаний местных температур и скоростей газа в зоне горения и на выходе камеры сгорания следует учитывать возможность как асинхронности колебаний в указанных плоскостях, так и окружной неравномерности отрыва потока от стенок в диффузоре при синхронных и асинхронных колебаниях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. -М.: Наука, 1973.
2. Монин А.С., Яглом А.М.. Статистическая гидромеханика. Ч. I, -М.: Наука, 1995, ч. II. - М.: Наука, 1967.
3. Идельчик И.Е.. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. -М.: Машиностроение, 1992.
4. Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Газодинамика диффузоров и выпускных патрубков турбомашин. -М.: Энергия, 1970.

УДК 632.15.621.311.22

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА (NO) В ПРОЦЕССЕ ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА

Ивлиев А.В.

*Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара*

Источники образования оксидов азота при горении можно разделить на три основные группы: "термические", "быстрые" и "топливные" NO.

Основные реакции, определяющие образование термической NO и мо-