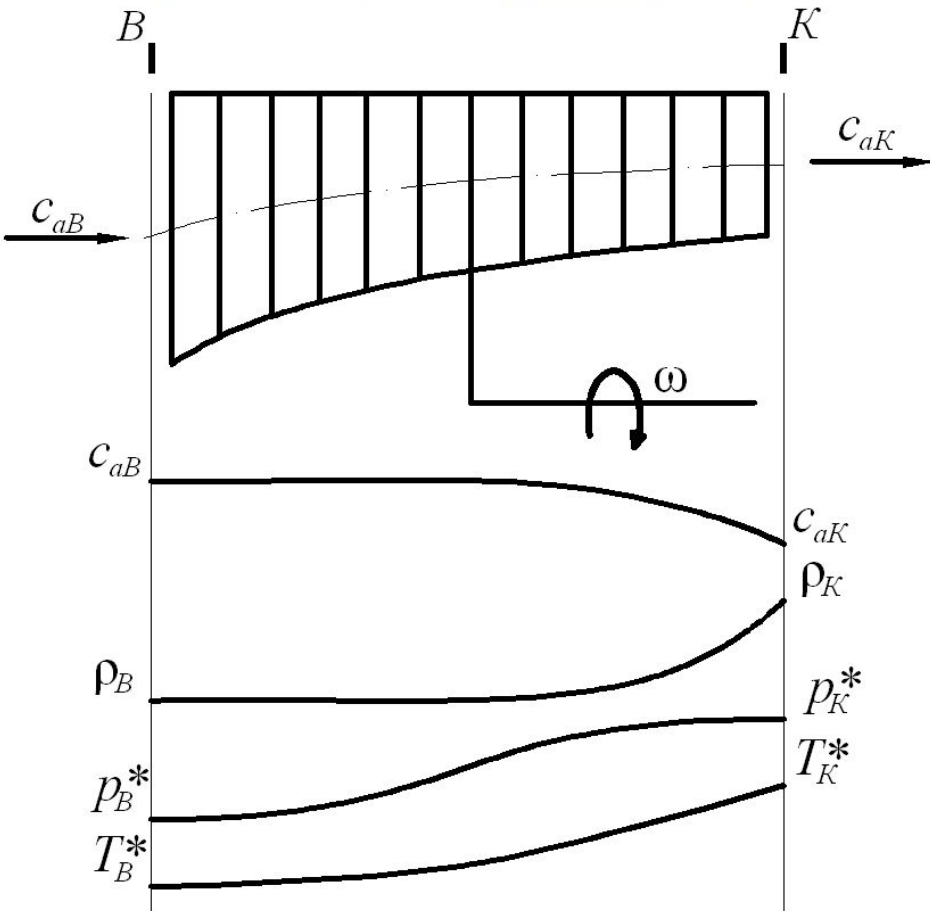


Лекция №10

Изменение параметров потока в проточной части компрессора

Схема изменения параметров потока в МОК

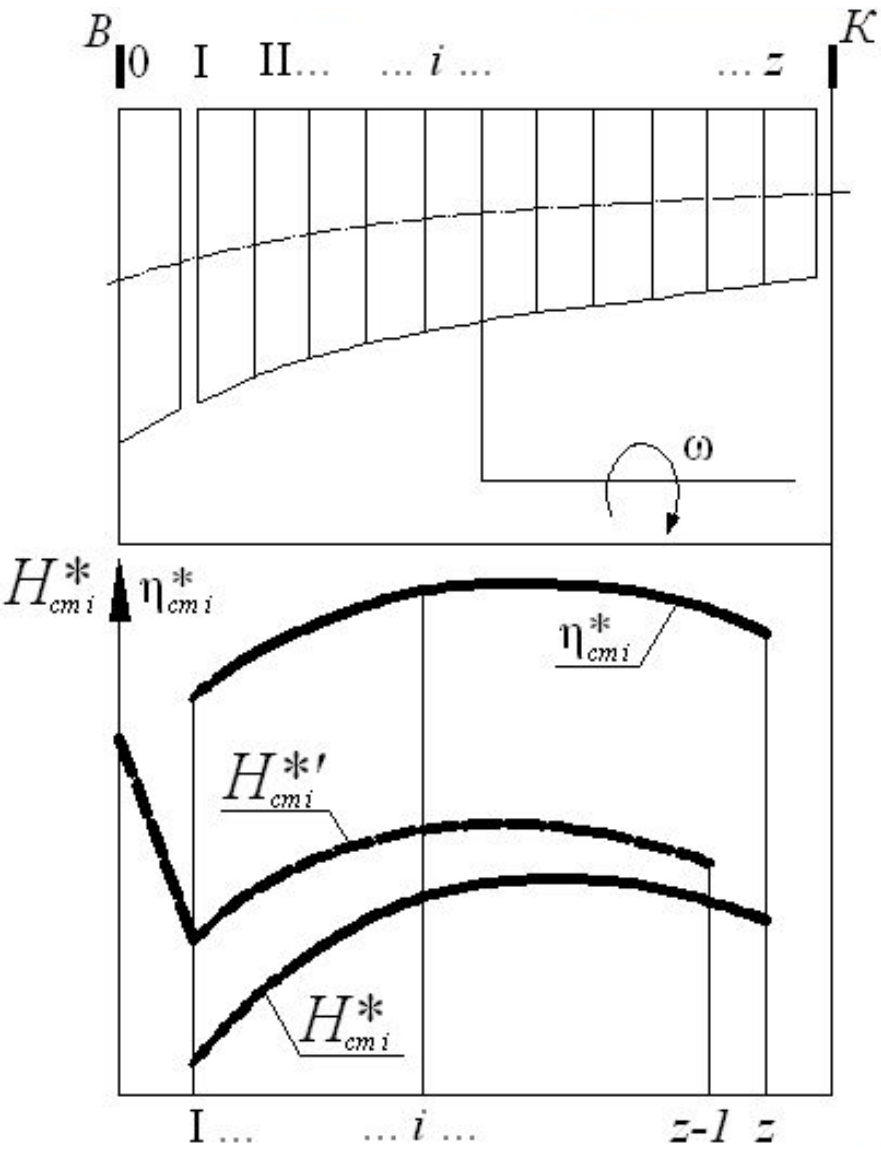


Ступени одного и того же ОК работают в неодинаковых условиях: В первых ступенях втулочное отношение d мало, температура рабочего тела относительно низкая. Периферийные участки обтекаются потоком с высокими числами Маха, а корневые – с малыми, т. е. получить в корне таких ступеней высокую работу сжатия невозможно. Кроме того, поток на входе в компрессор неравномерен из-за влияния воздухозаборника, а на переменных режимах углы атаки в первых ступенях могут сильно изменяться. Все это снижает запас устойчивости компрессора. Повысить его можно за счет снижения работы сжатия.

Работа сжатия в последних ступенях несколько снижается, т. к. со снижением осевой скорости необходимо и снижение закрутки потока, кроме того, КПД этих ступеней относительно низок, т. к. из-за относительно коротких лопаток кромочные потери высоки. Поэтому для повышения КПД компрессора в целом необходимо максимальную часть работы переложить на ступени с относительно длинными лопатками

Эти физические соображения определяют различие работ сжатия между ступенями в МОК. Здесь представлено характерное изменение параметров потока в МОК.

Физические основы распределения работы сжатия между ступенями



При проектировании ОК после выбора меридиональных обводов проточной части компрессора и значений осевой составляющей скорости производят распределение работы сжатия по ступеням.

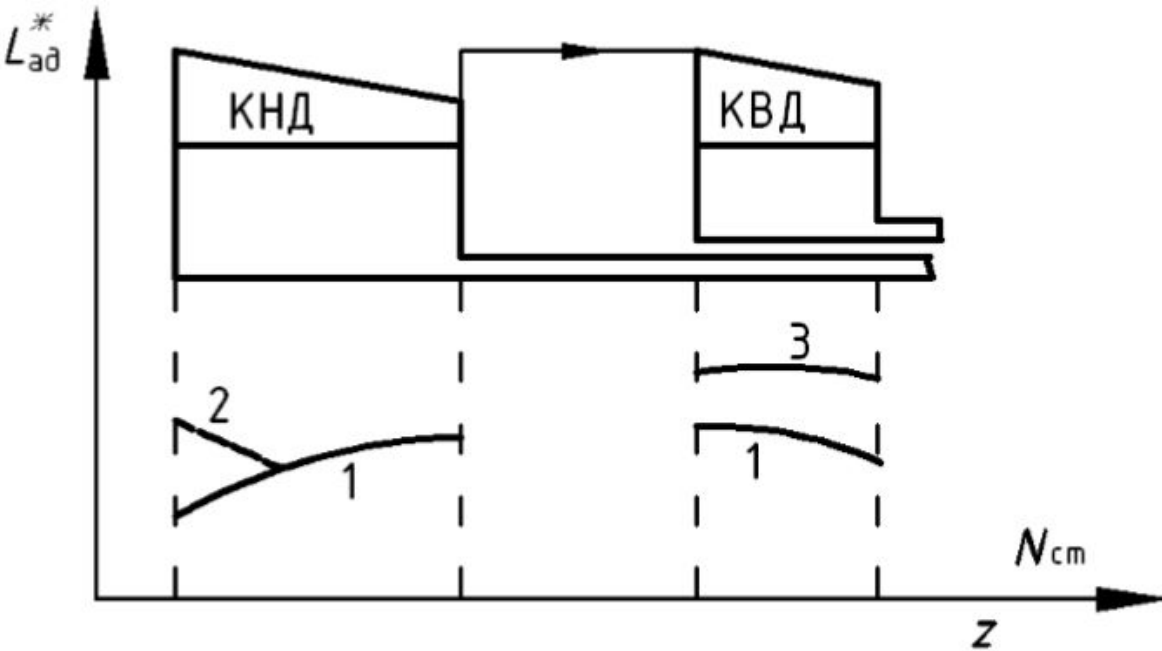
Распределение работы сжатия по ступеням должно решать две основные задачи:

- учесть изменение термодинамических параметров рабочего тела по проточной части (например, первые ступени сжимают холодный воздух, значит, здесь при относительно небольшой затрачиваемой работе могут быть получены высокие степени повышения давления);
- учесть изменение геометрических размеров элементов проточной части. Типичное распределение работы сжатия по ступеням дозвукового осевого компрессора $H_{cm i}^*$

В первых ступенях и в меньшей мере в последних ступенях работа сжатия $H_{cm i}^*$ заметно снижена по сравнению с работой, приходящейся на каждую из средних ступеней.

Для повышения напорности первых ступеней их иногда выполняют транс- или сверхзвуковыми. В этом случае кривая распределения работы по ступеням несколько меняется

Распределение работ сжатия в двухкасдных осевых компрессорах



Широко распространены конструкции компрессоров, разделенных на два каскада, каждый из которых имеет самостоятельный привод. Их условно подразделяют на компрессор низкого давления (КНД) и компрессор высокого давления (КВД). Каждый компрессор приводится своей турбиной.

Оба каскада, КНД и КВД, образуют один компрессор, изменение высот лопаток, осевой скорости и форма проточной части которого определяются теми же законами, что и у однокаскадного.

Распределение работы между каскадами выбирается с учетом возможностей приводящих турбин. Особенностью распределения является то, что вследствие роста температуры рабочего тела вдоль тракта компрессора увеличивается скорость звука. Это означает, что при равных значениях числа Маха можно повысить напорность ступеней КВД за счет увеличения окружных скоростей. Это достигается повышением частоты вращения ротора КВД в сравнении с ротором КНД. Все это определяет стандартный вид кривой распределения работы сжатия по ступеням двухкаскадного компрессора.

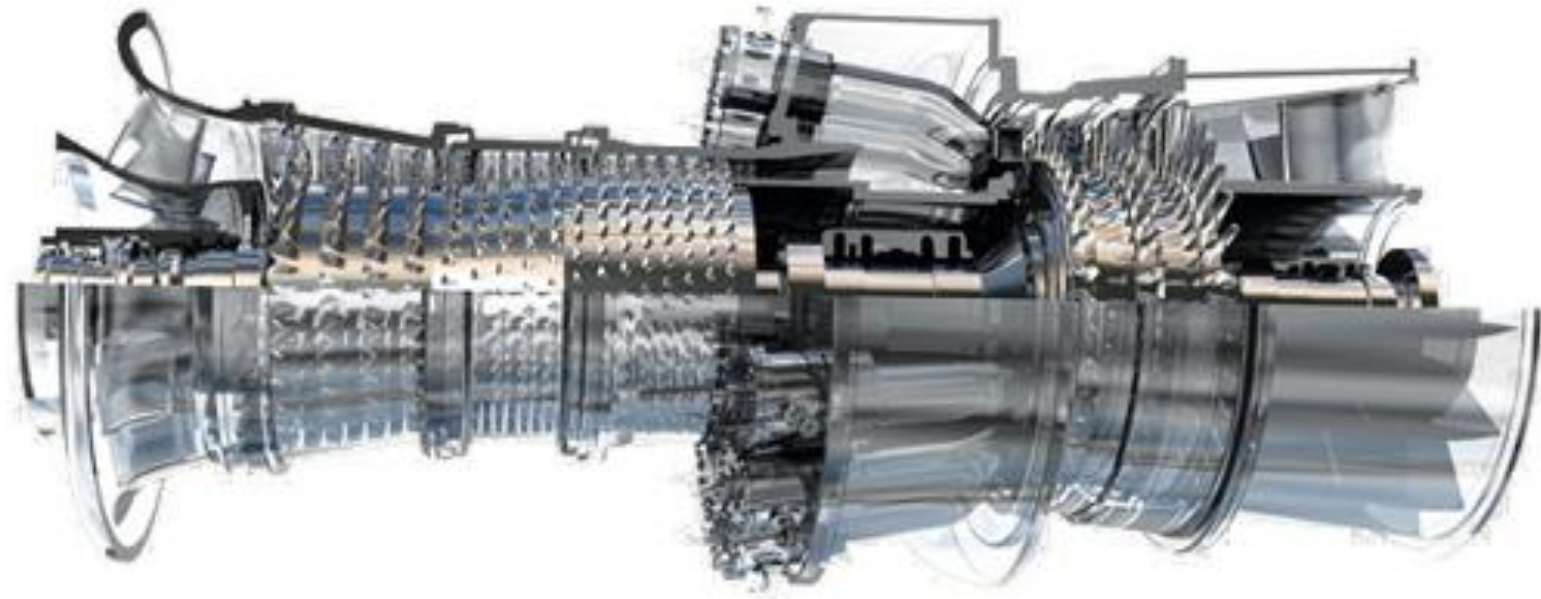
Имеются примеры разделения компрессора на три каскада с тремя приводящими их турбинами. Деление компрессора на три каскада затруднено при использовании в опорах роторов подшипников скольжения, требующих горизонтальных разъемов. В современных энергетических ГТУ большой мощности применяют ~~однокаскадные компрессоры~~ **однокаскадные компрессоры** имеют лучшие массогабаритные характеристики и, как будет показано ниже, лучше приспособлены для работы на переменных режимах, однако конструктивно они сложнее однокаскадных.

Камеры сгорания газотурбинных установок

Конструктивные особенности камер сгорания

В газотурбинных установках роль горячего источника выполняет камера сгорания, в которой рабочему телу передается тепло, выделяющееся в результате горения топлива. Таким образом, камера сгорания является одним из самых ответственных и теплонапряженных узлов ГТУ. В камерах сгорания совершается процесс подвода тепла к рабочему телу. Этот процесс, осуществляемый в результате протекания реакции горения топливного газа, является эффективным в случае обеспечения полноты и устойчивости сгорания топлива на различных режимах работы ГТУ. Сгорание будет полным, если продукты сгорания не способны дальше окисляться, то есть процесс протекает с минимальными физическими и химическими недожогами. Все это является важным условием, которое необходимо выполнять при проектировании любой камеры сгорания, характеризующейся высоким значением КПД и рассчитанной на определенные тепловые нагрузки.

Данные проблемы на протяжении многих лет решали различные ученые мирового сообщества.

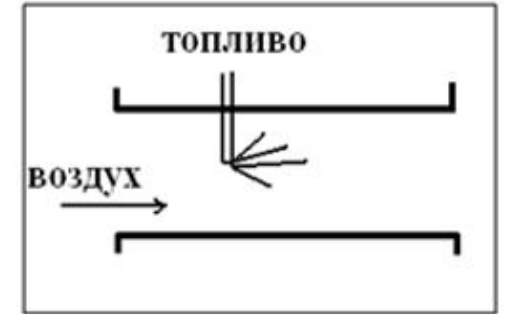


Конструктивные особенности камер сгорания

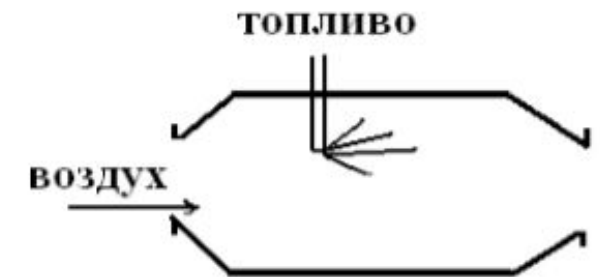
Первые камеры сгорания имели форму прямой цилиндрической трубы. Такая форма не могла обеспечить постоянство давления в зоне горения и, следовательно, часть энергии сжатия, создаваемого компрессором, тратилась впустую. Это не обеспечивало полноты сгорания топлива. Поэтому ход развития камер сгорания в дальнейшем был связан с изменением формы. На смену простейшей форме, пришла диффузионная¹. Кроме того, такая форма создавала зоны торможения, тем самым снижая скорость воздушного потока вдоль внутренней поверхности камеры сгорания.

Но данное решение все же не позволяло в полной мере регулировать скорость воздушного потока и предотвращать такие процессы, как отрыв пламени, что необходимо для поддержания устойчивого процесса горения. Поэтому, в дальнейших исследованиях разработчики уделяли большое внимание проблеме устойчивого горения топлива в камерах сгорания ГТУ при переменных избытках воздуха. С помощью обратных токов была создана зона малых скоростей, путем введения в камеру сгорания плохообтекаемых тел - стабилизаторов. Первые стабилизаторы пламени имели форму пластины. При этом для достижения необходимой температуры требовалось такое соотношение топливно-воздушной смеси, что ее концентрация могла превысить верхний предел воспламеняемости, то есть содержание топлива в воздухе становилось таким, что дальнейшее обогащение смеси горючим топливом делало ее невоспламеняемой. Далее появились уголкообразные стабилизаторы V-образной формы, струйномеханические, представляющие собой центробежную форсунку с кольцевой камерой закручивания и т. д.

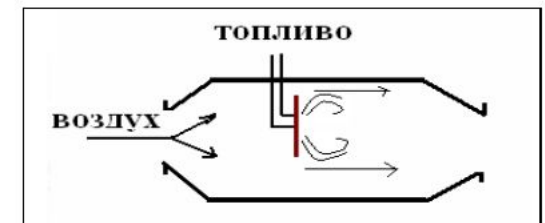
Камеры сгорания в форме цилиндрической трубы



Камеры сгорания в форме диффузора



Камеры сгорания пластинами



Конструктивные особенности камер сгорания

Проскок пламени - это перемещение фронта пламени из зоны камеры сгорания внутрь смесительного канала. При проскоке пламени образуются продукты неполного сгорания топлива.

Это явление наблюдается в случае, если скорость выхода газовой смеси меньше скорости распространения пламени. Причинами проскока пламени могут быть понижение давления газа или воздуха или уменьшение производительности смесительных каналов (их засорение).

Отрыв пламени – это перемещение фронта пламени в направлении движения газовой смеси, сопровождающееся погасанием пламени. Отрыв приводит к наполнению камеры сгорания газовой смесью, а затем может произойти хлопок или даже взрыв. При этом явлении скорость выхода газа или газовой смеси больше скорости распространения пламени. Причина такого явления – резкое повышение давления газа или воздуха, нарушение соотношения расходов газ – воздух, резкое увеличение разрежения на выходе из камеры сгорания, работа камеры сгорания за верхним пределом производительности, указанным в техническом паспорте.

Так как в камерах сгорания происходит преобразование химической энергии топлива в кинетическую энергию поступательного движения продуктов сгорания, то данный процесс сопровождается выделением большого количества тепла и продуктов сгорания, имеющих высокую температуру (от 1100 С и более). Поэтому перед исследователями встал вопрос о защите стенок камер сгорания от прогара.

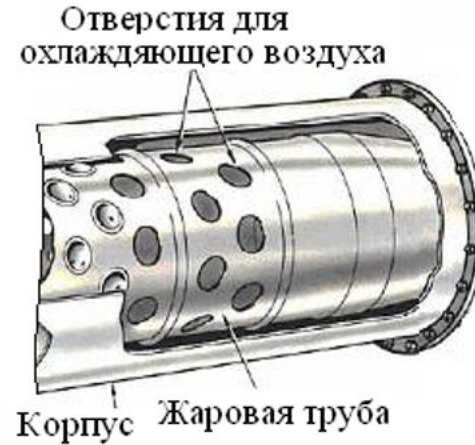
Эту проблему на примере камер сгорания реактивных двигателей в начале 20 века предложил решить К.В. Циолковский («Изучение мировых пространств реактивными приборами», 1903 г.). Стенки камеры должны были охлаждаться одним из компонентов топлива.

Русский исследователь Ю.В. Кондратюк предлагает не только охлаждать стенки, но и изготавливать их из термически устойчивых металлов.

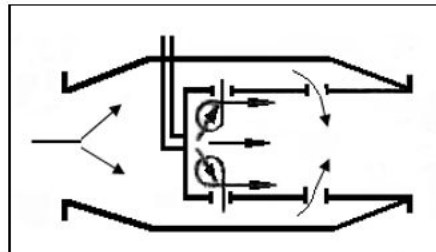
Под руководством С.П. Королева группа ученых разрабатывает камеры сгорания типа «труба в трубе». Наружное охлаждение осуществляется при помощи охладителя (газифицированного кислорода), который протекает в зазоре между цилиндрическими гладкими внутренней и наружной стенками

Конструктивные особенности камер сгорания

Немецкие конструкторы в начале 1940Ух гг. пошли еще дальше. Они разрабатывают камеры, как с наружным, так и внутренним охлаждением. Внутреннее охлаждение осуществлялось через несколько рядов отверстий во внутренней стенке для снижения температуры газа в пристеночном слое.



Кроме того, созданная конструкция типа «труба в трубе» с внутренними перфорированными отверстиями позволяла решать не только проблему снижения температуры стенки камеры и снижения температуры продуктов сгорания, но и позволила создать зону малых скоростей. В этой зоне процесс горения поддерживается циркуляционным потоком продуктов сгорания, непрерывно поджигающим поступающую в камеру свежую топливовоздушную смесь.



Классификация камер сгорания

Камеры сгорания классифицируют:

1. по назначению;
2. по принципу действия;
3. по движению потока воздуха и продуктов сгорания;
4. по компоновке;
5. по конструктивным особенностям корпуса и жаровой трубы;

1. по назначению:

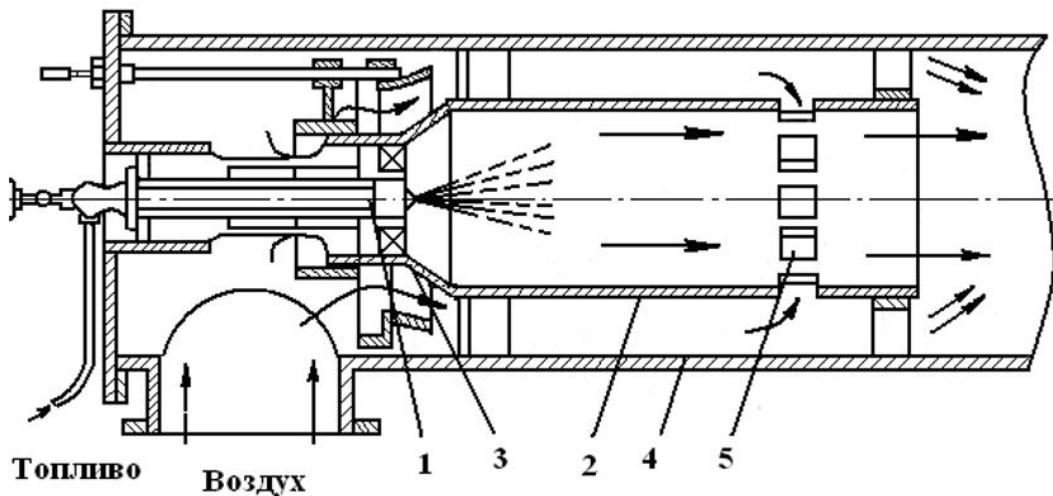
Камеры сгорания бывают основные, промежуточного подогрева и резервные.

2. По принципу действия:

Камеры сгорания бывают периодического и непрерывного действия.

В периодических камерах сгорания процесс горения осуществляется в следующей последовательности: заправка камеры топливновоздушной смесью, вспышка, расширение и продувка (удаление продуктов сгорания), затем процесс повторяется. Такие камеры используются в поршневых двигателях внутреннего сгорания и для решения различных задач, определяющих характеристики цикла ГТУ.

Камера сгорания прямоточная (непрерывного горения)



Сгорание топлива, впрыскиваемого через форсунку 1, происходит в зоне горения камеры, ограниченной жаровой трубой 2. В эту зону поступает только такое количество воздуха, которое необходимо для полного и интенсивного сгорания топлива (этот воздух называется первичным).

Поступающий в зону горения воздух проходит через завихритель потока 3, который способствует хорошему перемешиванию топлива с воздухом. В зоне горения температура газов достигает 1300...2000 °С.

По условиям прочности лопаток газовых турбин такая температура недопустима, поэтому получающиеся в зоне горения камеры горячие газы разбавляются холодным воздухом, который называется вторичным. Вторичный воздух протекает по кольцевому пространству между жаровой трубой 2 и корпусом 4. Часть этого воздуха поступает к продуктам сгорания через окна 5, а остальная часть смешивается с горячими газами после жаровой трубы. Таким образом, компрессор должен подавать в камеру сгорания в несколько раз больше воздуха, чем необходимо для сжигания топлива, а поступающие в турбину продукты сгорания получают сильно разбавленными воздухом и охлажденными.

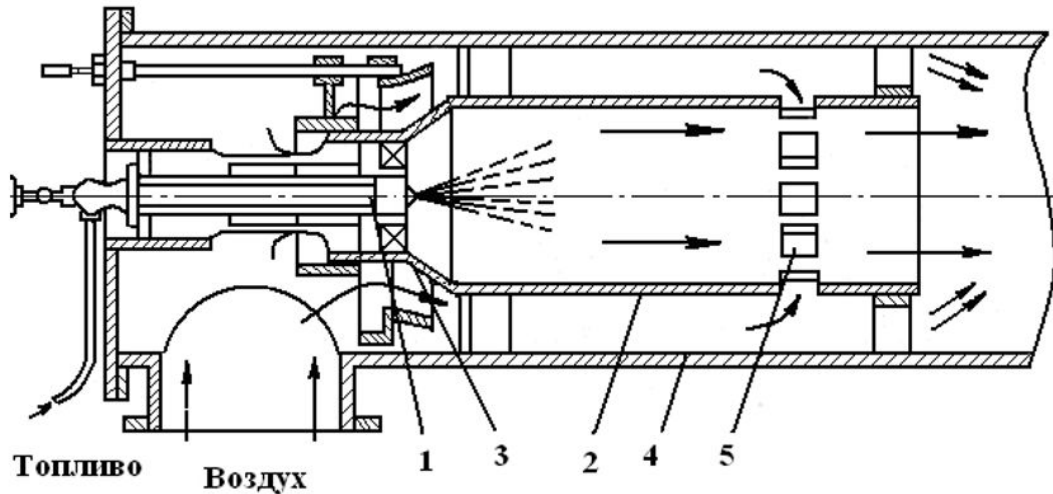
2. По принципу действия:

В идеальном случае коэффициент избытка воздуха α в камере сгорания близок к 1,25, хотя, например, при желании снизить выбросы окислов азота, эта величина может быть увеличена до 1,6. В жаровой трубе создается зона малых скоростей, в которой процесс горения поддерживается циркуляционным потоком продуктов сгорания, непрерывно поджигающим поступающую в камеру свежую топливовоздушную смесь. Избыточная (ненужная для горения) часть воздуха вводится в жаровую трубу за зоной горения, где она перемешивается с горячими продуктами сгорания, понижая, таким образом, их температуру до приемлемого для турбины уровня. Основными требованиями для всех камер сгорания непрерывного действия являются: устойчивость процесса горения, высокая теплонапряженность, максимальная полнота сгорания, минимальные тепловые потери, надёжная работа в течение установленного ресурса работы двигателя. В зависимости от температуры, развиваемой в К. с. непрерывного действия, в качестве конструкционных материалов для их изготовления применяют: до 500 °С - хромоникелевые стали, до 900 °С - хромоникелевые стали с добавкой титана, выше 950 °С - специальные комбинированные материалы и различные покрытия, например керамические. Камеры сгорания непрерывного действия относятся к числу важнейших узлов различных авиационных и космических двигательных установок, специальных и транспортных газотурбинных установок.

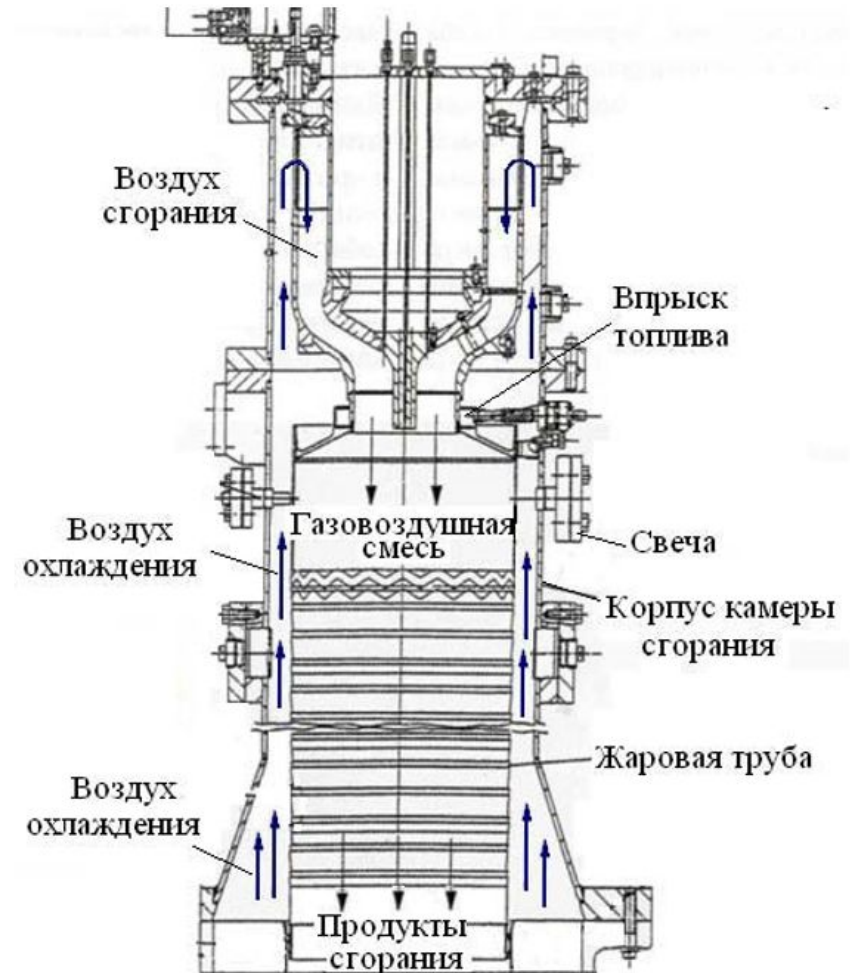
3. По движению потока воздуха и продуктов сгорания

камеры разделяют на прямоточные (движение продуктов сгорания и воздуха осуществляется в одном направлении), и противоточные. В прямоточных камерах сгорания потери давления меньше, чем в противоточных.

Камера сгорания прямоточная



Камера сгорания ГТУ итальянской фирмы Nuovo Pignon с противоточным конвективным охлаждением



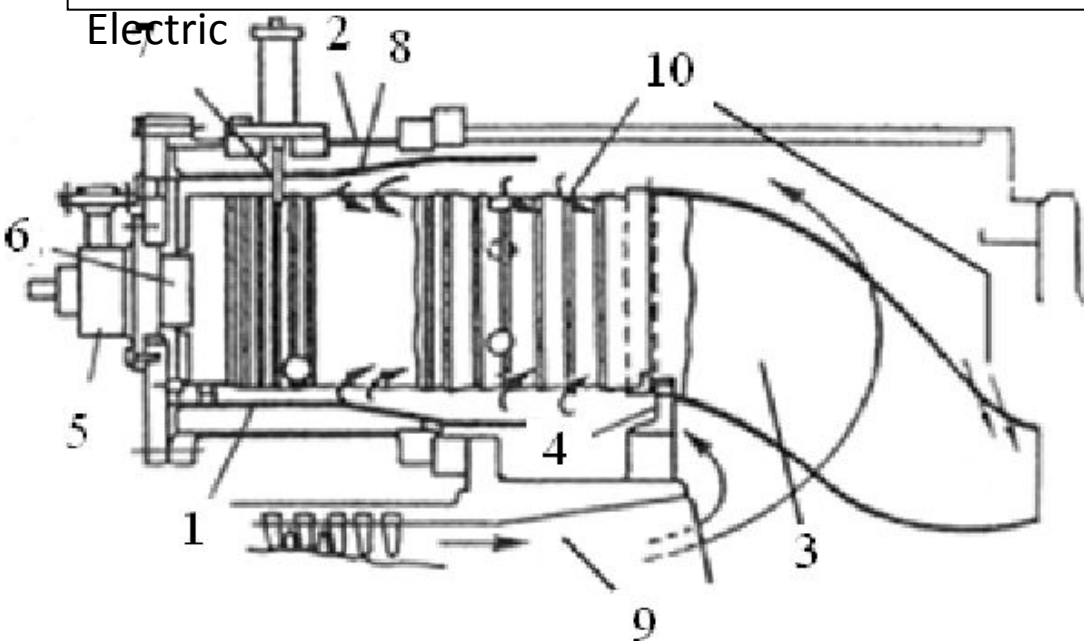
4. по компоновке:

Или с точки зрения расположения камеры сгорания на двигателе, их разделяют на выносные и встроенные.

Выносные камеры сгорания размещают в отдельном силовом корпусе с одной силовой трубой параллельно или под углом к продольной оси к газотурбинному двигателю.

Выносная камера сгорания фирмы Jeneral

Electric



1 – жаровая труба; 2 – наружный корпус (отдельный для каждой жаровой трубы); 3 – сборник для продуктов сгорания; 4 – опора; 5 – фронтное устройство; 6 – форсунки; 7 – свеча зажигания; 8 – дефлектор; 9 – сжатый после компрессора воздух; 10 – охлаждающий воздух

Здесь представлена выносная камера сгорания двигателя для ГТУ наземного применения фирмы Jeneral Electric, в которой каждая жаровая труба 1 имеет наружный силовой корпус 2. Корпус легко отсоединяется от общего корпуса. Поэтому жаровую трубу можно извлекать и осматривать, кроме того можно обследовать сопловый аппарат первой ступени турбины, что является важнейшим моментом для увеличения срока долговечной и надежной работы всей системы ГТУ.

Жаровая труба телескопически соединена с газосборником продуктов сгорания 3, который закреплен с помощью опоры 4. Жаровая труба имеет фронтное устройство 5 с топливной форсункой 6 и свечу зажигания 7.

Фронтное устройство – это входная часть жаровой трубы, в которой располагаются топливоподающие устройства и каналы подвода воздуха для обеспечения начального очага горения.

Для обеспечения равномерной подачи воздуха в жаровую трубу и улучшения условий охлаждения ее стенки предусмотрен дефлектор 8, который образует охлаждающую

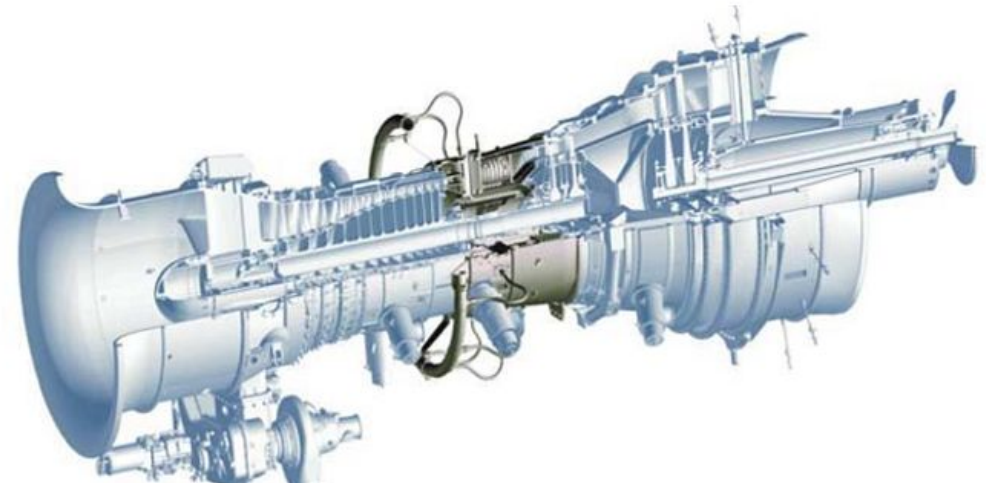
4. по компоновке:

Выносные камеры сгорания с отдельными жаровыми трубами удобно обслуживать, диагностировать и проводить ремонтные работы. Они проще в доводке, удешевляют разработку различных дополнительных устройств, предназначенных для повышения эффективности работы и уменьшения образования вредных выбросов в атмосферу. Кроме того, газосборные тракты (каналы) продуктов сгорания, расположенные между камерой и турбиной намного длиннее, чем у встроенных камер сгорания ГТУ, что позволяет более качественно перемешивать продукты сгорания с охлаждающим воздухом, и, тем самым, снижать уровень температурной нагрузки на первую ступень турбины.

К недостаткам выносных камер сгорания относят большие размеры с развитой поверхностью охлаждения и более сложные условия для компенсации тепловых расширений газосборных трактов.

Применяют эти камеры в основном в стационарных и значительно реже в передвижных установках, а чаще в установках с регенерацией теплоты отходящих газов, прежде всего в связи с необходимостью организовать движение потоков воздуха и продуктов сгорания между компрессором и газовой турбиной.

Пример размещения выносных камер сгорания ОАО «Авиадвигатель»



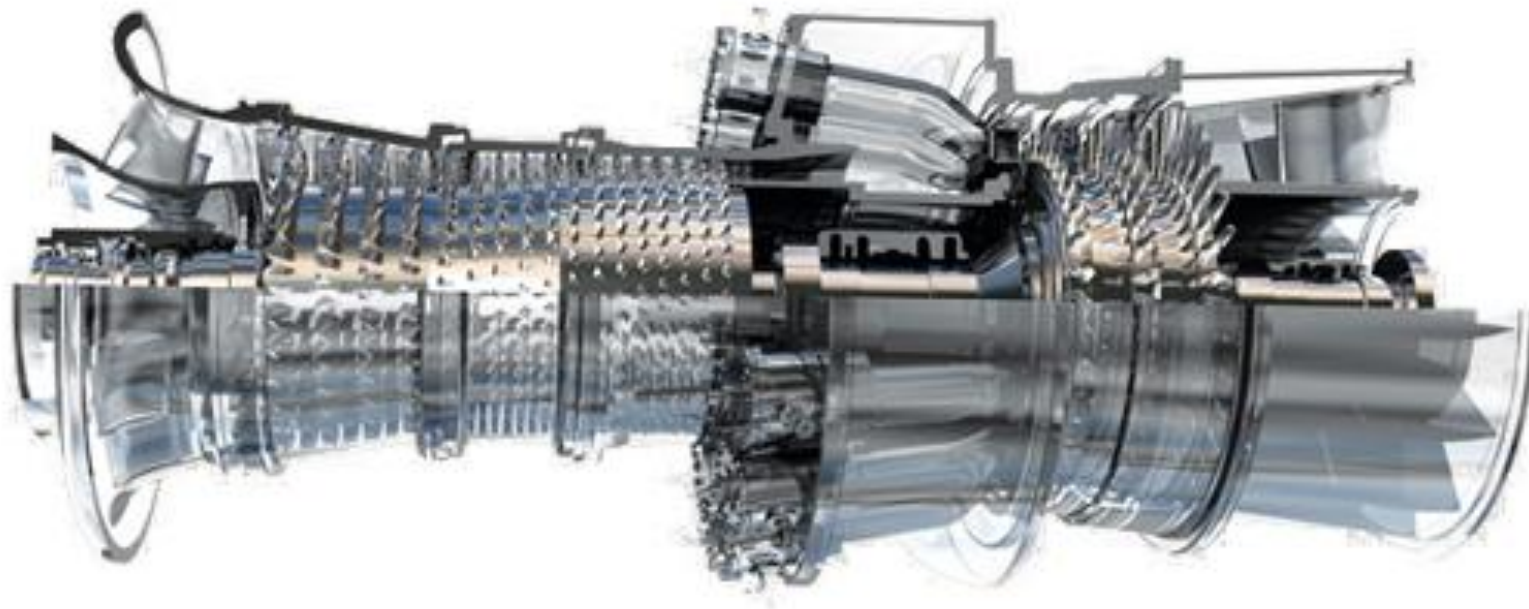
двигатель ПС-90ГП



ГТУ 12ПГ-2 на базе двигателя ПС-90А

4. по компоновке:

У встроенных камер сгорания корпус опирается непосредственно на общий корпус турбокомпрессора или конструктивно с ним совмещён. Встроенные камеры сгорания располагаются концентрично между компрессором и газовой турбиной, что позволяет значительно уменьшить габариты и массу установки, уменьшить количество модулей, повысить блочность конструкции, облегчить ее обустройство на компрессорной станции. Направление движения потока воздуха во встроенных камерах сгорания может быть различным: прямоточным или противоточным по отношению к направлению потока воздуха в компрессоре. Различие в схемах движения потока воздуха, поступающего в камеру сгорания, практически не меняет рабочий процесс сжигания топлива и величину потерь давления по камере в целом.



Лекция №11

4. по конструктивным особенностям:

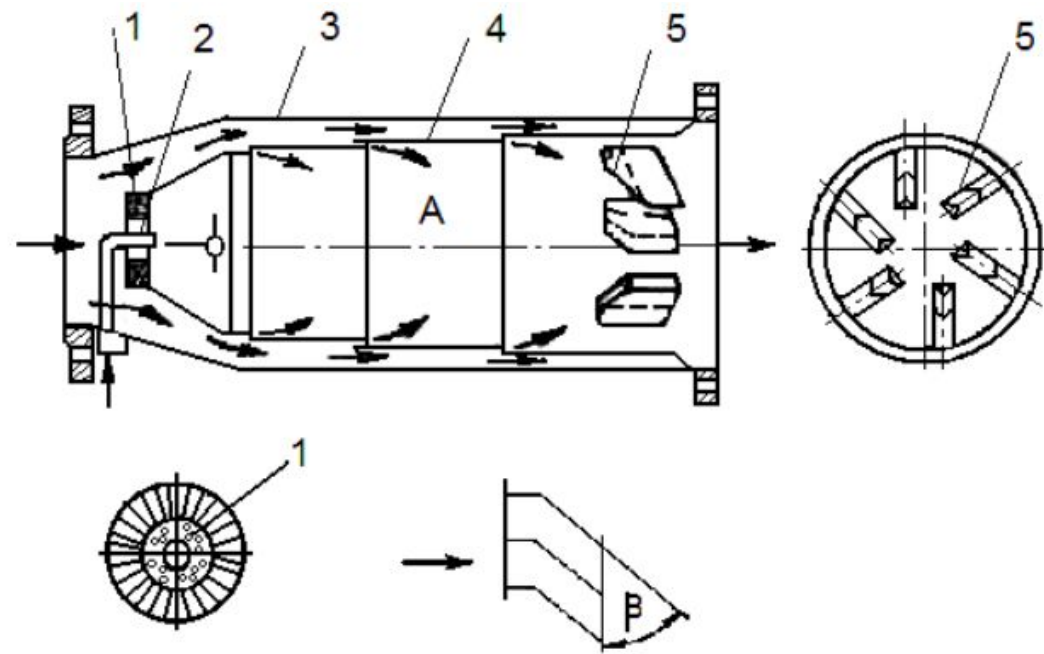
Камеры сгорания подразделяют на:

- *трубчатые (индивидуальные и многосекционные);*
- *кольцевые;*
- *трубчато-кольцевые.*

Конструктивно камеры сгорания всех типов включают: диффузор; жаровую трубу; наружный кожух; фронтное устройство (топливная форсунка, завихритель, стабилизатор), систему перфорации (отверстия различного диаметра получения топливовоздушной смеси нужного состава и смешения воздуха с продуктами сгорания для их охлаждения).

Трубчатые камеры сгорания просты по конструкции, удобны в эксплуатации, надежны в работе. Существуют индивидуальные трубчатые (их еще могут называть индивидуальные цилиндрические) и много-секционные трубчатые.

Индивидуально трубчатые камеры сгорания



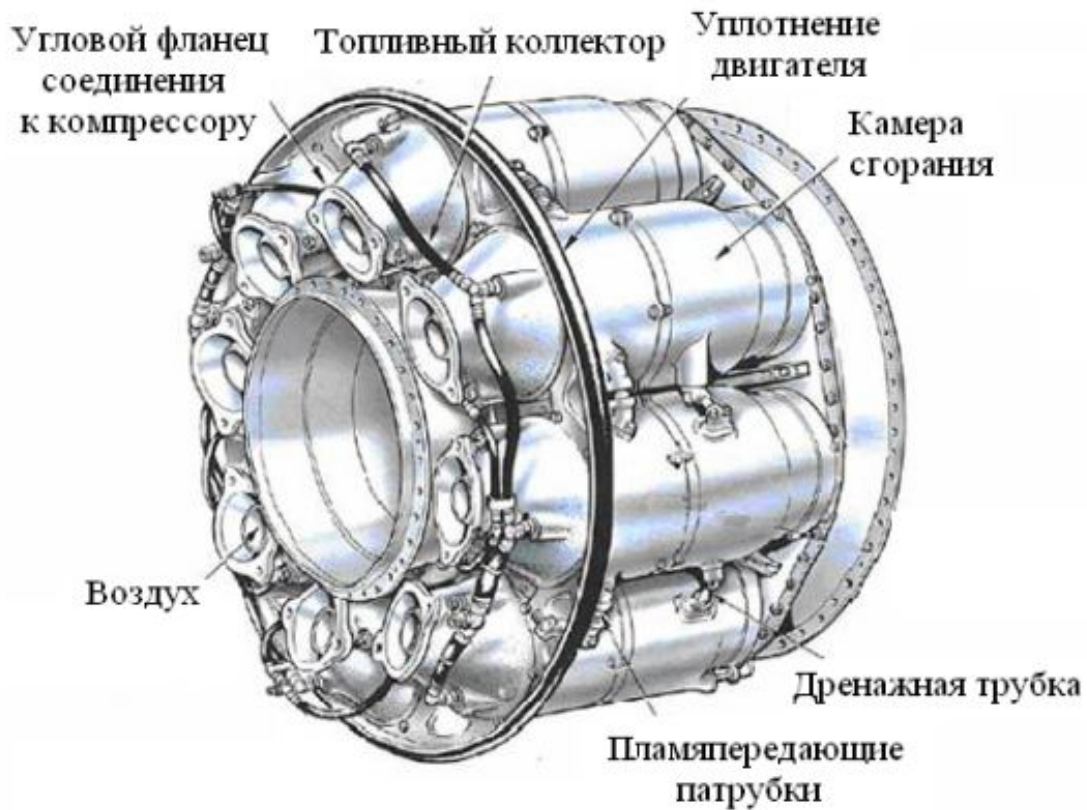
Первичный воздух поступает через воздухо-направляющее устройство 1 в пламенную трубу 4, куда через форсунку 2 (или горелку) подается топливо. Расход первичного воздуха регулируется в зависимости от расхода топлива поворотом лопаток воздухо-направляющего устройства 1, что осуществляется по средством специальных рычагов управления. Вторичный (охлаждающий) воздух пропускается через кольцевое пространство между пламенной трубой 4 и корпусом 3 камеры сгорания. При движении он интенсивно охлаждает стенки трубы и корпуса. Выходя из кольцевого пространства, вторичный воздух попадает в объем А, где он смешивается с продуктами сгорания, понижая тем самым их температуру до заданного значения.

Для уменьшения закрутка газового потока на выходе из камеры и для лучшего перемешивания вторичного воздуха с продуктами сгорания к пламенной трубе приварены лопатки 5, закручивающие поток вторичного воздуха в направлении, обратном тому, которое придается первичному воздуху.

В индивидуальной трубчатой (цилиндрической) камере можно установить не одну, а несколько форсунок, что увеличивает надёжность работы и позволяет регулировать тепловую мощность камеры сгорания изменением числа работающих форсунок. Объемная теплонапряженность этих камер составляет $(20...30) \cdot 10^3$ кВт/м³ при давлении 0,4...0,45 МПа, а тепловая мощность камеры сгорания достигает 3000 кДж/ч, расход воздуха - $2,5 \cdot 10^5$ м³/ч,

К преимуществам индивидуальных трубчатых (цилиндрических) камер сгорания относятся простота конструкции и сравнительно малые потери давления, достигающие 1,5...3,0 %. Основными недостатками этих камер являются большие массы и габариты.

Многосекционные трубчатые камеры сгорания



Представляют собой конструкцию, в которой объединено несколько (6...16) параллельно работающих цилиндрических камер (секций), часто связанных между собой пламя передающими патрубками.

Камеры расположены вокруг двигателя и воздух, подаваемый компрессором направляется по каналам в отдельные камеры сгорания. Каждая из них имеет внутреннюю жаровую трубу, вокруг которой расположен корпус с воздушной прослойкой.

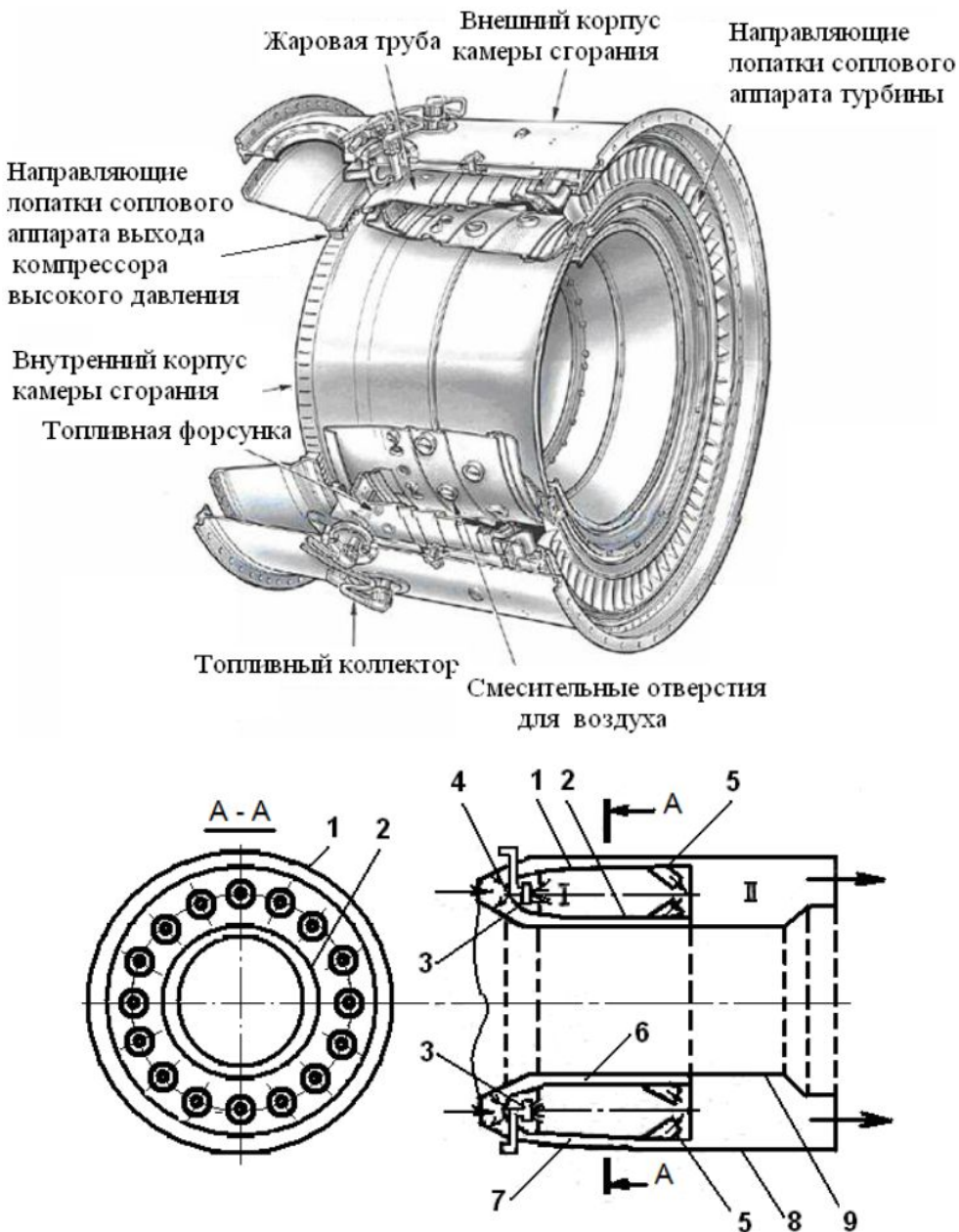
Многосекционные трубчатые камеры сгорания выполняют обычно в виде единого моноблока, в котором все секции заключены в общий корпус. Каждая секция имеет одну форсунку, впрыскивающую топливо по направлению потока. Секционные камеры сгорания отличаются компактностью, обеспечивают высокую полноту сгорания топлива и устойчиво работают в различных эксплуатационных условиях.

Их недостатки: большие поперечные размеры двигателя за счет не используемого пространства между камерами; не входят в силовую схему двигателя; трудность распространения пламени между камерами. Сравнительно большие потери давления (2,5...7,5 %). Тепловая мощность отдельной секции составляет в среднем $(0,7...1,7) \cdot 10^3$ кВт, а иногда достигает $3,5 \cdot 10^3$ кВт. Объемная теплонапряженность у камер этого типа высокая - $(100...160) \cdot 10^3$ кВт/м³.

Кольцевая камера сгорания

Образована кольцевым пространством, заключенным между наружным и внутренним корпусами двигателя. Она компактна, входит в силовую схему двигателя, пламя легко распространяется по всей камере.

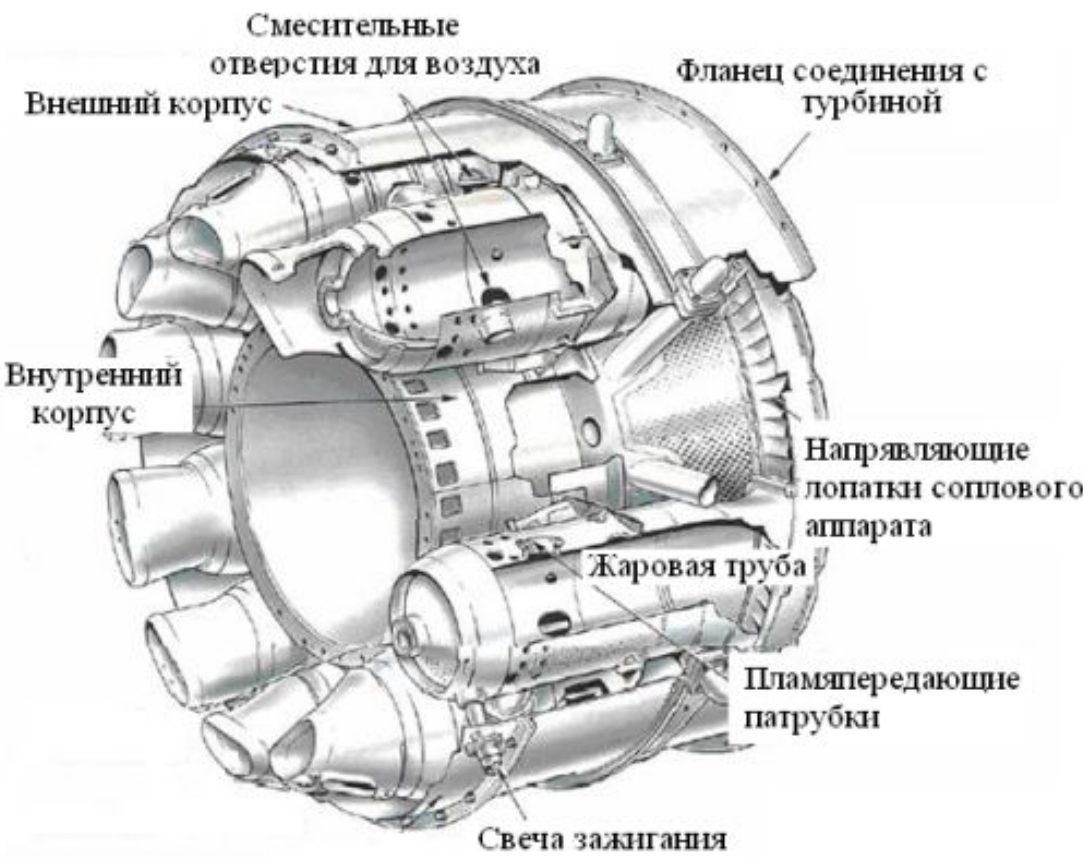
В кольцевых камерах сгорания зона горения I имеет форму кольцевой полости обычно шириной 150...200 мм, которая образуется цилиндрами 1 и 2. Два других соосно расположенных цилиндра (9 и 8) составляют кожух камеры. Первичный воздух через воздухоподводящее устройство 4 поступает в зону горения I. Вторичный воздух направляется по кольцевым зазорам 6 и 7 к смесительным насадкам 5, через которые поступает в зону II, где смешивается с продуктами сгорания, понижая тем самым их температуру. В воздухоподводящем устройстве 4 на входе в зону горения I по всей окружности расположены форсунки 3. За счет этого обеспечивается хорошее перемешивание топлива с воздухом и горение по всему кольцевому пространству. Число форсунок может достигать 10...20, но иногда это бывает одна вращающаяся форсунка. теплонапряженность у кольцевых камер примерно такая же, как и у секционных, а потери давления несколько больше (до 10 %). По сравнению с секционными камерами они имеют меньший рабочий объем и более равномерное поле температур газа на выходе. Кольцевые камеры сложнее в изготовлении и доводке, труднодоступны для осмотра в ходе эксплуатации.



Трубчато-кольцевые камеры сгорания

В таких камерах отдельные жаровые трубы заключены в общий корпус, придающий жесткость всей конструкции. Они имеют преимущества трубчатых камер сгорания и свободны от недостатков кольцевых камер сгорания.

Трубчато-кольцевые камеры имеют теплонапряженность и потери давления приблизительно такие же, как секционные камеры. Они компактнее кольцевых камер и более просты в доводке. Небольшие размеры пламенных труб упрощают их изготовление и разборку.



Требования, предъявляемые к камерам сгорания

К камерам сгорания предъявляются следующие требования:

- Высокая устойчивость горения во всем диапазоне эксплуатационных режимов работы двигателя без срывов, опасных пульсаций и затухания пламени;
- Максимально-возможная полнота сгорания (экономичность процесса сгорания).
- Малые габаритные размеры и небольшой вес камеры сгорания.
- Оптимальный закон распределения температуры газов на выходе из камеры сгорания во избежание местных перегревов и повреждений сопел и лопаток.

Обеспечение высокой устойчивости горения во всем диапазоне эксплуатационных режимов работы является основным требованием к камерам сгорания. Устойчивость горения определяется:

- *составом топливовоздушной смеси;*
- *стабильностью параметров давления, температуры и скорости воздуха на входе в камеру сгорания;*
- *соотношением скоростей распространения пламени и движения топливовоздушной смеси в камере сгорания.*

Состав топливовоздушной смеси. Для полного сгорания топлива к нему должно подводиться строго определенное количество кислорода или воздуха. Минимальное количество кислорода в килограммах, необходимое для полного сгорания 1 килограмма топлива, определяется теоретически необходимым расходом сухого воздуха L_0 .

Как следует из конструктивных особенностей современных камер сгорания в реальных условиях к топливу подводится, как правило, большее количество воздуха, чем теоретически необходимо. Отношение действительного количества воздуха, к теоретически необходимому определяется коэффициентом избытка воздуха α . Данный коэффициент определяет качественный состав топлива. Если $\alpha = 1$, то топливно-воздушная смесь является смесью «теоретического состава». При $\alpha > 1$ - смесь «богатого состава», то есть, обогащена топливом, при $\alpha < 1$ - смесь «бедного состава».

Требования, предъявляемые к камерам сгорания

От качественного состава смеси сильно зависит величина температуры продуктов сгорания. Максимальная температура продуктов сгорания наблюдается при значении $\alpha = 1$, так как при этом выделяется максимальное количество тепла. При $\alpha < 1$ температура продуктов сгорания на выходе из камеры сгорания уменьшается вследствие охлаждения газов воздухом, не принимающим участие в сгорании. При значениях $\alpha > 1$ температура продуктов сгорания так же уменьшается, но уже по другой причине – из-за неполноты сгорания (в продуктах сгорания присутствует значительное количество недоокисленных соединений).

Стабильность параметров давления, температуры и скорости воздуха на входе в камеру сгорания. В процессе эксплуатации ГТУ со временем меняются давление, температура и скорость воздуха на входе в камеру сгорания. Изменение величин этих параметров так же влияет на полноту и устойчивость процесса горения. Так, уменьшения давления воздуха, приводит к уменьшению коэффициента полноты сгорания из-за снижения скорости горения и ухудшения перемешивания (распыления) топлива.

Понижение температуры воздуха на входе в камеру сгорания ухудшает время образования смеси топлива и воздуха, тем самым может возникнуть такое явление, как задержка воспламенения, что снижает скорость горения. Уменьшается полнота сгорания топлива.

При заданном составе смеси увеличение скорости воздуха на входе в камеру сгорания приводит к уменьшению времени пребывания порций свежей топливно-воздушной смеси в зоне обратных токов, что снижает полноту сгорания, а при дальнейшем увеличении скорости воздуха может привести и к срыву пламени.

Соотношение скоростей распространения пламени и движения топливовоздушной смеси в камере сгорания. Если поджечь топливовоздушную смесь, находящуюся в замкнутой камере, то через определенное время, называемое периодом задержки воспламенения, вокруг воспламенителя образуется очаг пламени. Очаг пламени, распространяясь по объему смеси, образует фронт пламени, отделяющий несгоревшую смесь от продуктов сгорания. Фронт пламени со средней скоростью (скорость сгорания) перемещается по камере. Причинами движения фронта пламени являются расширение продуктов сгорания из-за роста температуры и

Требования, предъявляемые к камерам сгорания

Для устойчивого горения смеси скорость сгорания должна быть большей или равной скорости движения топливоздушнoй смеси. Величина скорости сгорания смеси определяется скоростью протекания химической реакции, которая зависит от рода топлива, качественного состава смеси, который характеризуется значением α и начальной температуры смеси. С целью увеличения скорости сгорания производится интенсивная турбулизация топливо-воздушнoй смеси. Турбулизация искривляет фронт пламени, резко увеличивая его поверхность, повышая количество вещества, сгорающего в единицу времени.

Максимально-возможная полнота сгорания обеспечивается конструктивным выполнением и организацией рабочего процесса в камере сгорания. Полнота сгорания оценивается коэффициентом полноты сгорания (иногда называют коэффициентом выделения тепла), который определяется отношением действительно выделившегося количества тепла при сгорании 1 кг топлива к низшей теплоте сгорания этого топлива.

Малые габаритные размеры и небольшой вес камер сгорания достигается их большой теплонапряженностью. Теплонапряженность камеры сгорания характеризуется количеством тепла, приходящегося в единицу времени на единицу объема камеры, отнесенное к давлению газов в ней.

Оптимальное распределение температуры отходящих газов на выходе из камеры сгорания обеспечивает надежную работу лопаток турбины. Поле температур газа на выходе из камеры сгорания неравномерно.

Неравномерность обусловлена целым рядом причин, назовем основные:

- *неравномерность полей скоростей воздуха в диффузоре и кольцевых каналах камеры,*
- *неравномерность распределения топлива и воздуха в зоне горения камеры,*
- *дискретность подвода воздуха в жаровую трубу.*

Требования, предъявляемые к камерам сгорания

Для уменьшения неравномерности полей температур необходимо совершенствовать все узлы камеры сгорания, в том числе и зону смешения. Установлено, что необходимым условием для получения требуемой эпюры температур является обеспечение достаточной глубины проникновения струй воздуха в поток в зоне смешения, которая зависит от импульса подводимого воздуха. Так в кольцевых камерах сгорания величина проникновения струй воздуха должна быть не меньше половины высоты сечения жаровой трубы.

Неравномерность поля температур складывается из окружной и радиальной неравномерностей температурного поля. Окружная неравномерность вредна. При проектировании и эксплуатационной доводке камеры сгорания стремятся сделать ее минимальной. Радиальную неравномерность (распределение температуры вдоль радиуса) подчиняют определенному закону. Делают так, чтобы максимальная температура приходилась на расстояние, равное примерно $2/3$ высоты лопатки. Это объясняется тем, что корневые элементы лопаток турбины, подверженные действию наибольших напряжений разрыва, а концевые, имеющие наименьшую толщину и поэтому легче поддающиеся обгоранию, должны омываться потоком газа меньшей температуры.

Охлаждение стенки камеры сгорания и понижение температуры продуктов сгорания

Объем вторичного воздуха, не участвующего в процессе сгорания составляет примерно 50...60 % от общего, поступающего из осевого компрессора.



Разделение воздуха на первичный и вторичный потоки



Охлаждение стенки жаровой трубы

Для тепловой защиты корпуса камеры сгорания от высокотемпературных продуктов сгорания применяют ненапряжённые (в силовом отношении) проницаемые экраны. При этом используется примерно 60 % от объема вторичного воздуха. По тракту охлаждения (каналу между корпусом и экраном (внутренней поверхности стенок жаровой трубы)) протекает газ (или чистый воздух) с относительно низкой температурой. Происходит изоляция поверхности их от горячих газов, образуемых при горении. Такой способ носит название «конвективно-пленочная система охлаждения».

Охлаждающий воздух подаётся через несколько кольцевых щелей различной формы в стенке вдоль внутренней поверхности жаровой трубы. По мере роста параметров рабочего процесса двигателя возрастают лучистые потоки теплоты светящегося пламени в жаровой трубе к её стенкам, в связи с чем растет число поясов охлаждения и увеличивается конвективная составляющая охлаждения. Для снижения температуры стенки жаровой трубы на её внутреннюю поверхность наносятся теплозащитные покрытия.

Охлаждение стенки камеры сгорания и понижение температуры продуктов сгорания

Так как в современных газотурбинных двигателях температура газа перед турбиной значительно превышает уровень температур, допустимый по условиям жаростойкости и жаропрочности, применяемых в турбинах материалов, то около 30 % объема вторичного воздуха используется для понижения температуры газов в зоне разбавления перед подачей на турбину.

Наиболее теплонапряжёнными элементами являются сопловые и рабочие лопатки, диски турбин. При умеренном уровне температуры газа перед турбиной (до 1250 К) применяется обдув воздухом дисков, корпусов и хвостовиков лопаток. Для охлаждения сопловых лопаток первых ступеней турбин чаще всего используется конвективно-плёночная схема. В сопловых лопатках последующих ступеней применяется чисто конвективная схема охлаждения.

Горение должно завершаться перед разбавлением продуктов сгорания воздухом, поступающим в жаровую трубу, иначе поступающий воздух остудит пламя, и это приведет к неполному сгоранию топлива.

Формирование поля температур начинается в огневой зоне и заканчивается в концевой части жаровой трубы, которая называется областью смешения. Эта область обычно имеет конфузорную форму и ее протяженность составляет:

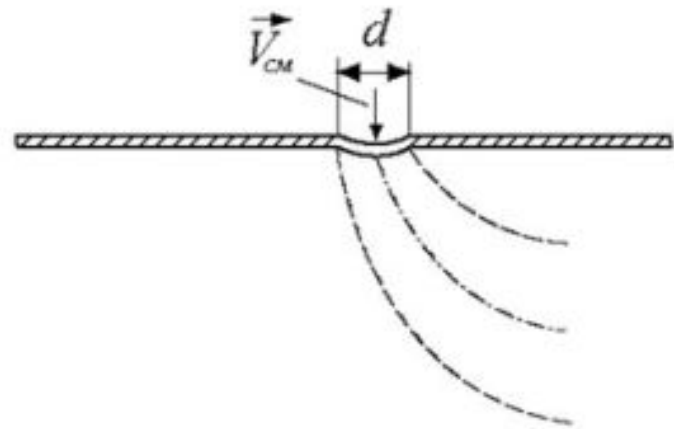
$$L \cong (0,3 \dots 0,4) L_1$$

L_1 – длина жаровой трубы.

Охлаждение стенки камеры сгорания и понижение температуры продуктов сгорания

В зоне смешения происходит интенсивное перемешивание продуктов сгорания с охлаждающим воздухом. Такое перемешивание называется вторичным смесеобразованием, для организации которого применяются специальные устройства, которые называются смесителями или смесительными окнами.

Опытные исследования показывают, что степень неравномерности температурного поля существенно зависит от дальнобойности струй воздуха. При оптимальном варианте струи должны проникать в поперечно движущийся поток горячих газов до оси жаровой трубы. Если дальнобойность меньше оптимальной, то в центральной части области смешения возникает перегрев. В том случае, когда пробивная способность струй велика, центральная часть оказывается закрытой для прохода горячих газов и здесь возникает зона пониженных температур.

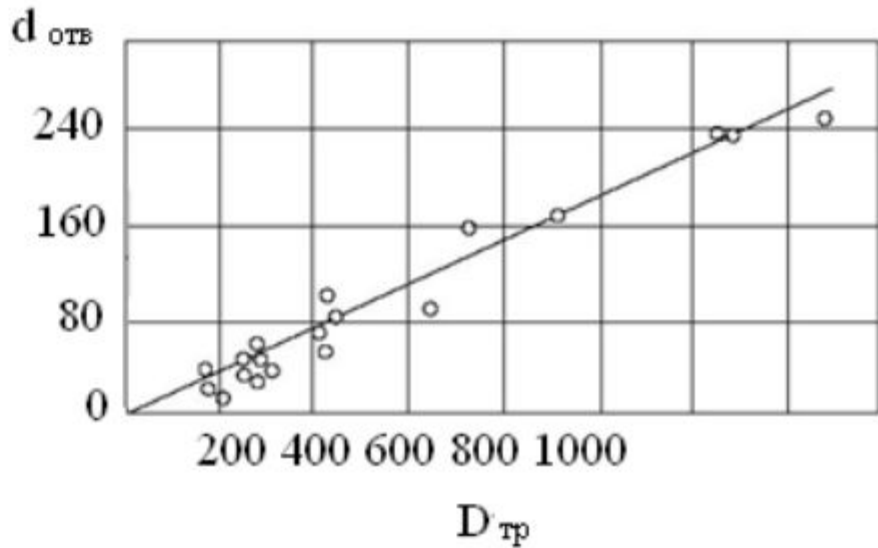


Проникновение струи воздуха в поток продуктов сгорания

Суммарная эффективная площадь отверстий в стенке жаровой трубы должна обеспечивать распределению расхода воздуха по зонам жаровой трубы. Геометрическая площадь отдельных отверстий определяется соотношением эффективной площади к коэффициенту расхода воздуха (для лопаточных завихрителей коэффициент расхода воздуха подбирают по справочным данным, а за геометрическую площадь принимают площадь самого узкого места в межлопаточном канале). Размеры отверстий находят по результатам теплового расчета жаровой трубы. Очень важно соотношение между количеством отверстий в стенке жаровой трубы и их размерами. При этом определяется такая величина, как глубина проникновения струи воздуха (ее пробивная способность) в общий поток топливного газа или продуктов сгорания (рис. 1.65), обеспечивающая максимальную степень перемешивания всех компонентов.

Анализ опытных данных показывает, что скорость воздуха в отверстиях не должна превышать скорость потока газа более чем в 1,5 раза и обычно лежит в пределах 50...70 м/с.

Охлаждение стенки камеры сгорания и понижение температуры продуктов сгорания



Из графика зависимости диаметра отверстий смесителя ($d_{отв}$) от диаметра жаровой трубы ($D_{тр}$), следует, что между $d_{отв}$ и $D_{тр}$ существует линейная зависимость.

Эффективность работы смесителя зависит от числа и способа расположения отверстий. Число отверстий (n) определяется из уравнения сплошности:

$$G_{см} = \rho v_{см} \frac{\pi d_{отв}^2}{4} n \Rightarrow n = \frac{4G_{см}}{\rho v_{см} \pi d_{отв}^2}$$

Где $G_{см}$ – суммарный расход воздуха, проходящего через смесители; ρ – плотность воздуха; $v_{см}$ – скорость воздуха в смесителе; $d_{отв}$ – диаметр отверстия.

Отверстия в рядах можно располагать коридорным или шахматным способами. При коридорном расположении отверстий перемешивание происходит на более коротком участке, чем при шахматном. Однако в этом случае заметно возрастают гидравлические сопротивления.

Дырчатые смесители достаточно эффективно работают, если диаметр жаровых труб не превышает 320 мм. В жаровых трубах большего диаметра обычно применяют цилиндрические или овалыные сопла различной высоты.

Во избежание обгорания переднюю кромку сопел срезают под углом 30...45 градусов. Не зависимо от применения типа смесителей обязательно должны выполняться требования: неравномерности поля температур перед сопловым аппаратом турбины не должны превышать 4...5 %, а максимальная температура газового потока на выходе из жаровой трубы формироваться на высоте 2/3 длины лопатки.