

УДК 621. 452. 3

Статистический анализ влияния размерности на параметры камер сгорания ГТД.

А.М. Ланский, С.В. Лукачев, С.Г. Матвеев

Аннотация

В статье приведен анализ влияния размерности на характеристики и параметры камер сгорания ГТД. Показаны особенности связанные с изменением параметров цикла и облика двигателя, а так же с изменением масштаба относительных величин, характеризующих конструкцию и процессы в камере сгорания.

Ключевые слова:

камера сгорания; статистика; размерность; параметры цикла; геометрические размеры.

В литературе, где рассматривается вопрос моделирования технических изделий, представлены две основных точки зрения. Первая связана с упрощенным подходом, когда, начиная с некоторой величины тяги или мощности, ГТД называют малоразмерными.

Достаточно продолжительное время такое деление производили, ориентируясь на величину максимальной тяги P_{\max} (мощности $N_{e \max}$) двигателя. Считалось, что если двигатели имеют $P_{\max} < 50 \dots 80 \text{ кН}$ $N_e < 2 \dots 4 \text{ МВт}$, то они – малоразмерные.

В настоящее время определение размерности двигателя основано на величине приведенного по параметрам на выходе из компрессора расхода воздуха $G_{\text{В ПР}}$:

$$G_{\text{В ПР}} = G_{\text{В}} \frac{P_{\text{Н}}}{P_{\text{К}}^*} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{К}}^*}{288}}$$

К малоразмерным относятся двигатели с расходом $G_{\text{В ПР вых}} < 1,5 \dots 2,5 \text{ кг/с}$ или величиной пропускной способности турбины (которую обычно обозначают A_T) - $A_T < (0,012 \dots 0,016 \text{ м}^2)$ [1...4].

При этом отмечается ряд особенностей в облике двигателей, например, последняя ступень компрессора центробежного типа, а сопряженная с ней камера сгорания (КС) противоточной схемы. Однако указание на эти особенности не позволяет полностью выяснить специфику организации рабочего процесса КС, поскольку тот же центробежный компрессор и противоточная камера могут быть использованы в двигателях и средней размерности. Такое разделение носит условный характер, хотя и не лишено определенных оснований, поскольку эта группа изделий имеет ряд общих особенностей:

- малые размеры проточной части, предопределяющие использование нетрадиционных конструктивных форм узлов;
- разнообразие используемых схем двигателей в зависимости от целевого назначения летательного аппарата;
- небольшая продолжительность полетного цикла, эксплуатация в сложных условиях.

Другой подход известен из теории лопаточных машин, где установлено, что уменьшение их абсолютных размеров отражается на уровне коэффициента полезного действия (КПД) из-за роста относительных величин и неоднородностей потоков в межлопаточных каналах и потерь через зазоры. По сути, тот же принцип роста влияния относительной величины какого-либо фактора заложен в пояснении понятия малой размерности ГТД, предложенном в работе [1].

Рассматривая величину удельного веса ГТД

$$\gamma_{\text{дв}} = \frac{G_{\text{дв}}}{N} \approx f\left(\frac{D^3}{D^2}\right) = f D ,$$

делается вывод о линейности теоретической зависимости $\gamma_{\text{дв}} = f D$.

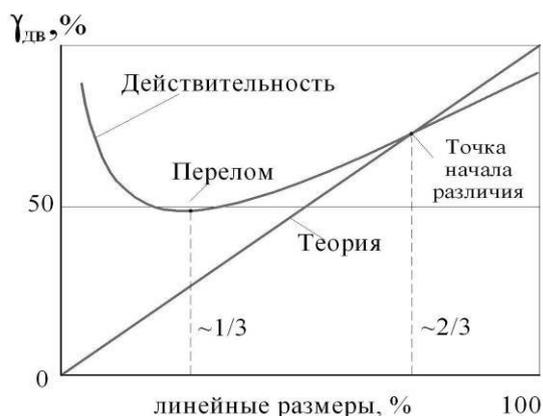


Рис. 1. Влияние линейных размеров двигателя на его удельный вес

Обобщая некоторую статистику, можно отметить, что при уменьшении размеров эта зависимость подтверждается лишь в небольшом диапазоне, а затем (рис. 1) в действительности существенно меняет свой характер. Анализируя данное обстоятельство,

автор указывает, что при моделировании ГТД в сторону уменьшения размеров далеко не все узлы удастся пропорционально масштабировать. Такие из них, как приборы, агрегаты, подшипники, начиная с каких-то мощностей двигателей, перестают уменьшать свои размеры, что приводит к росту их относительного веса.

С точки зрения газодинамики течения в основных узлах двигателя, принципиальной особенностью при уменьшении их размеров является рост относительной толщины пограничного слоя, которая в конечном итоге может привести к перестройке характера течения, т.е. и здесь просматривается тенденция, показанная на рис. 1. Поэтому можно сформулировать предположение, что при переходе от обычной к малой размерности каналов и струй в камере сгорания должен меняться характер протекания процессов, а следовательно, величина и набор критериев, которые их характеризуют. Если такого изменения не происходит, то следует говорить только об изменении размеров, но не размерности.

При расчете камер сгорания (особенно малоразмерных) необходимо выдерживать критерии Маха, Ричардсона, Рейнольдса, Багнольда и Дамкелера. Наиболее важными являются числа Маха и Багнольда.

Число Маха. Для камер сгорания число Маха можно выразить следующим образом:

$$\frac{G_B \sqrt{T_K^*}}{\mu \cdot F_0 \cdot P_K} = c \sqrt{\sigma_{ж}} = c_1 \cdot M,$$

где $\mu \cdot F_0$ – эффективная площадь отверстия, c и c_1 – константы.

Задание значения перепада давления (или числа Маха) при данных расходе, температуре и давлении определяет площадь отверстий жаровой трубы. Диапазон изменения площади отверстий невелик, так как излишне большие потери давления при малой площади отверстий неприемлемы. Большая камера сгорания, имеющая большую площадь отверстий, характеризуется низкими потерями давления, которые вызывают появление пиков температуры в турбине.

Из уравнения числа Маха можно вывести другое соотношение:

$$\frac{\text{Длина камеры с одной форсункой}}{\text{Длина камеры с } n \text{ форсунками}} = \frac{\sqrt{n}}{1} = \frac{\text{Объем камеры с одной форсункой}}{\text{Объем камеры с } n \text{ форсунками}}.$$

Из него следует, что можно существенно уменьшить длину и объем камеры путем применения множества небольших камер, которые ускорят перемешивание при сохранении скорости и уменьшении длины. Такой критерий широко используется в

кольцевых камерах сгорания и в поршневых многоцилиндровых двигателях и является основным критерием при конструировании этих машин.

Число Дамкелера определяется как отношение времени смешения к времени реакции. В случае очень малой камеры сгорания или множества уменьшенных камер сгорания скорость перемешивания увеличивается и влияние скорости реакции, выражающееся через полноту сгорания и стабилизацию пламени, может стать более сильным.

Число Багнольда представляет собой отношение центробежной силы к силе инерции применительно к полету капли топлива в закрученном потоке воздуха, создающем поле центробежных сил. Очевидно, что при уменьшении размеров камеры пропорционально увеличивается центробежная сила. Для сохранения геометрического подобия распределения жидкого топлива, необходимого при определяющей роли перемешивания, с уменьшением размера камеры нужно уменьшать размер капли. И в этом случае, пренебрегая изменением начальной скорости капли при впрыске ее в закрученный поток, можно показать, что при сохранении потерь давления на камере размер капли должен быть уменьшен в следующей пропорции:

$$\frac{D}{d} = \sqrt{\frac{R}{r}},$$

где R и r – внутренние радиусы воздушных завихрителей соответственно большой и малой камер; D и d – начальные размеры капель.

Аналогично можно показать, что при неизменных размерах камеры и возросшем расходе воздуха определяющая роль перемешивания сохраняется, если размер капли меняется следующим образом:

$$\frac{D}{d} = \sqrt{\frac{g_B}{G_B}},$$

где G_B и g_B – большой и малый расходы воздуха; D и d – соответствующие размеры капель.

В очень небольших камерах размер капли и скорость должны быть как можно меньшими.

В качестве критерия размерности автором используется параметр

$$G_{B\text{ПР}} = \frac{G_B \sqrt{T_K^*}}{P_K^*},$$

аналог числа Маха, который определяется только параметрами воздуха за компрессором. С учетом изложенного к малоразмерным относится камеры сгорания с расходом $G_{ВПР} \leq 0,25 \dots 0,42$.

Предположим, что всегда существует граница, при переходе через которую при моделировании изделия в сторону уменьшения размеров нарушается пропорциональность взаимосвязей основных показателей рабочего процесса.

Сопоставление статистических данных по размерам (рис. 2) и параметрам рабочего процесса (рис. 3) камер сгорания в области, перекрывающей размерности, которые считаются мало- и полноразмерными, показывает, что отличия между ними объективно

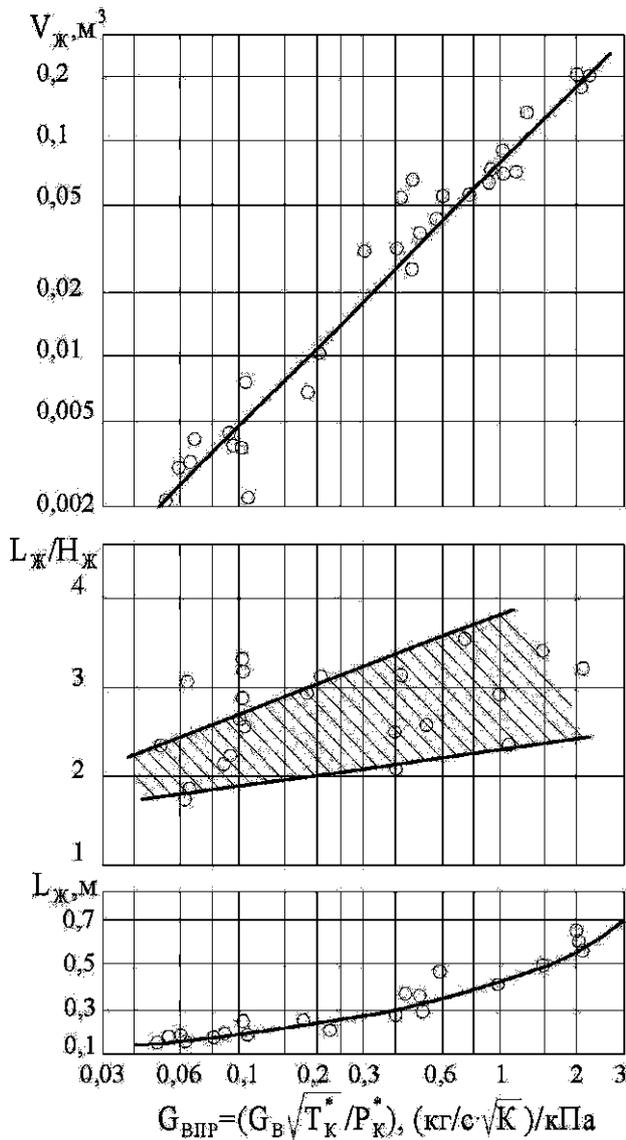


Рис. 2. Зависимость размеров камеры сгорания от приведенного расхода воздуха

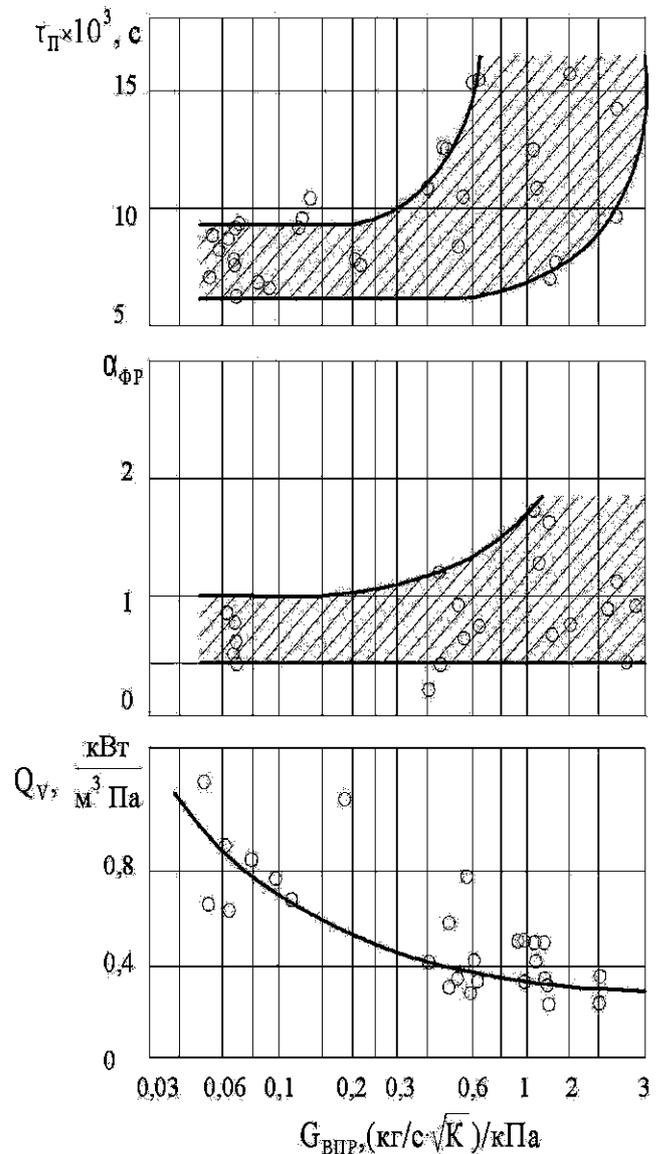


Рис. 3. Влияние размерности двигателя на параметры рабочего процесса камеры сгорания

существуют. Но их анализ не дает оснований для выделения каких-либо признаков, которые можно было бы отнести к принципиальным отличиям.

Проанализируем более подробно влияние уменьшения размеров изделия на его облик и выходные характеристики. Кроме объема жаровой трубы, который выбирается, исходя из требуемого уровня теплонапряженности либо коэффициента форсирования K_V , наиболее характерным изменениям могут быть подвержены струи подвода воздуха через стенки камеры сгорания и топливные форсунки.

Относительно размеров струй воздуха, втекающих в жаровую трубу через боковые стенки, можно предположить, что предел их минимизации диктует глубина проникновения струи. Поскольку дальнобойность струи пропорциональна ее диаметру, а необходимая глубина проникновения и связанная с ней дальнобойность диктуется функциями соответствующей зоны, но все-таки определяется высотой сечения жаровой трубы – $h_{ж}$, можно считать, что

$$d_0 = \text{const} \cdot h_{ж}.$$

Следовательно, при уменьшении $h_{ж}$ пропорционально должны меняться размеры ввода воздуха. Если принять коэффициенты расхода струй равными 1, то условие $\bar{G}_{Bi} = \text{const}$ преобразовывается в

$$\sum \bar{F}_{0i} = \frac{\sum F_{0i}}{F_{\text{БОК}}} = \text{const}.$$

Здесь $F_{\text{БОК}}$ – суммарная площадь боковой поверхности КС, а $\sum F_{0i}$ суммарная площадь всех отверстий, предназначенных для подвода воздуха в i -ю зону. Отсюда следует специфическая закономерность изменения количества отверстий в зависимости от размеров жаровой трубы. Так для цилиндрической трубы (индивидуальная или трубчатая КС)

$$\frac{n \cdot \pi \cdot \frac{d_0^2}{4}}{\pi \cdot h_{ж} \cdot L_{ж}} = \text{const}.$$

Тогда количество отверстий на единицу длины будет равно

$$\bar{n} = \frac{n}{L_{ж}},$$

с уменьшением размеров КС возрастает

$$\bar{n} = \frac{\text{const}}{h_{ж}}.$$

При кольцевой КС это соотношение выглядит несколько иначе:

$$\bar{n} = \frac{\text{const} \cdot R}{h_{\text{ж}}^2},$$

но при пропорциональном изменении размеров R и $h_{\text{ж}}$ сводится к предыдущему.

Таким образом, уменьшение размеров КС требует постепенного перехода к перфорации стенок все более мелкими отверстиями с большим их числом n . Естественным пределом здесь будет функциональное ограничение d_0 , с одной стороны, из-за возможности

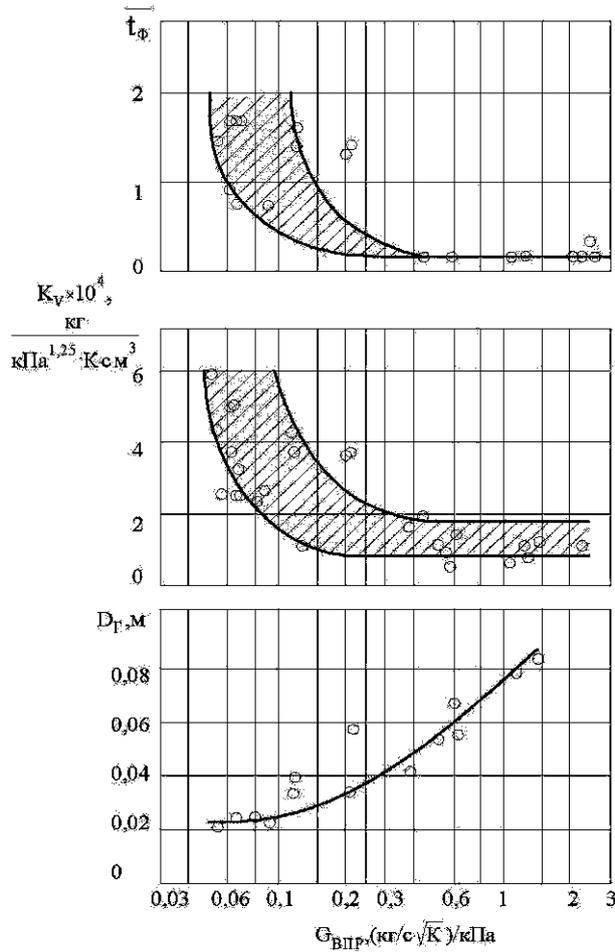


Рис. 4. Влияние размерности двигателя на конструктивные параметры, определяющие характеристики камер сгорания

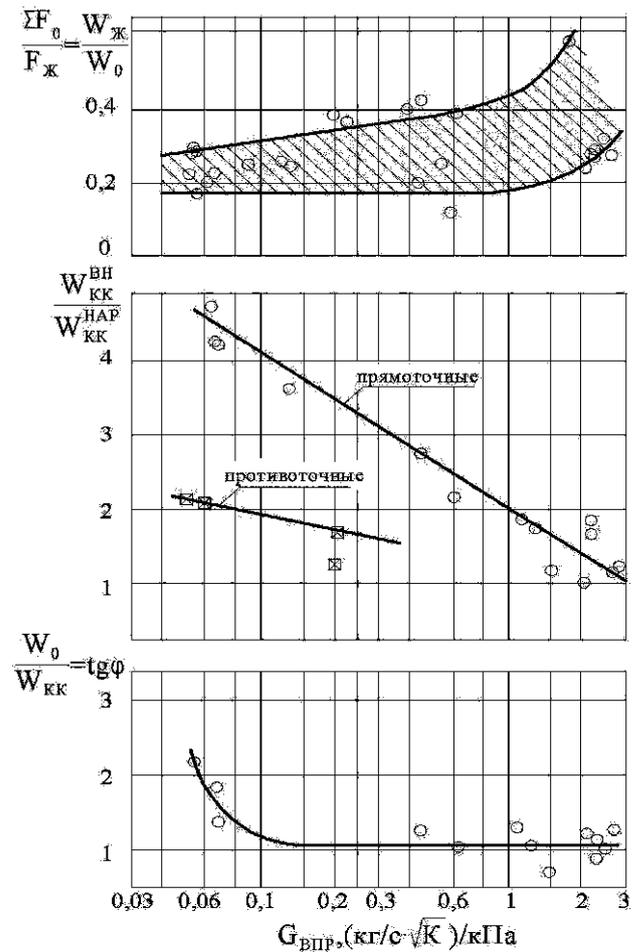


Рис. 5. Влияние размерности двигателя на конструктивные параметры, определяющие формирование ПТГ на выходе из КС

их засорения при эксплуатации двигателей в условиях грунтовых аэродромов, а с другой – из-за возможного снижения глубины их проникновения непропорционально изменению высоты жаровой трубы.

Относительная величина неравномерностей в распределении концентраций по сечению жаровой трубы может быть выражена как

$$\bar{\Delta} = \text{const} \cdot \frac{d^2}{F_{\text{ж}}},$$

где d – линейный размер источника неравномерности: струи газосборника, горелки, топливной форсунки и т. д. Очевидно, что при достижении струей, горелкой или форсункой их предельно минимальных размеров относительная величина $\bar{\Delta}$ начинает расти при уменьшении $F_{ж}$. Следует отдельно рассмотреть окружную неравномерность, задаваемую количеством точек n подвода топлива, при уменьшении размеров КС.

Поскольку расход топлива уменьшается пропорционально расходу воздуха (при $\alpha_k = \text{const}$), то при достижении существующего технологического ограничения на минимальный размер топливной форсунки число форсунок n начинает уменьшаться вместе с G_T . С другой стороны, дискретность подвода топлива по окружности кольцевой камеры $\frac{2 \cdot \pi \cdot R}{n}$ задает относительный размер неравномерности $\bar{\Delta}$ и выступает в качестве величины d .

Следовательно,

$$\bar{\Delta}_\phi = \text{const} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot R^2}{n^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h_{ж}} = \frac{\text{const} \cdot R}{n^2 \cdot h_{ж}}$$

При пропорциональном уменьшении R и $h_{ж}$

$$\bar{\Delta}_\phi = \frac{\text{const}}{n^2},$$

и эта зависимость может внести самые большие ограничения в возможность создания камер сгорания существенно малых размеров.

Таким образом, особенности, проявляющиеся в организации рабочего процесса с уменьшением размеров изделия, можно условно разделить на две группы:

1. Особенности, связанные с изменением параметров цикла и облика двигателя.
2. Особенности, связанные с изменением масштаба относительных величин, характеризующих конструкцию и процессы в камере.

Первая группа накладывает свой отпечаток на схему и конструкцию, что в конечном итоге реализуется в особенностях аэродинамической структуры течения и процесса подготовки ТВС в жаровой трубе. Вторая влияет на характеристики КС по полноте сгорания топлива, стабилизации пламени и формированию поля температур газа на выходе.

Подтверждением сделанных выводов является характер изменения основных конструктивных и режимных параметров ряда отечественных и зарубежных двигателей, определяющих характеристики выходного поля температуры газа в зависимости от их размерности $G_{в.пр}$ (рис. 4,5,6).

Библиографический список

1. Дадж А. Газотурбинные двигатели малой мощности.- М.: Иностранная литература, 1963. - 420с.

2. В.В. Кулагин, С.К. Бочкарев, И.М. Горюнов и др.; под общ. ред. В.В. Кулагина Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: учебник. Кн.3. Основные проблемы: Начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных ГТД, М.: Машиностроение, 2005, 464 с.

3. В.А. Григорьев, В.А. Зрелов, Ю.М. Игнаткин и др.; под общ. ред. В.А. Григорьева и Б.А. Пономарева, Вертолетные газотурбинные двигатели, -М.: Машиностроение, 2007, 491с.

4. А.М. Гурвич, А.С. Иссерлин, Особенности моделирования газогорелочных устройств, Энергомашиностроение, 1963, №2 ,с. 4-8.

Сведения об авторах

Ланский Анатолий Михайлович, 1950 г.р., окончил Куйбышевский авиационный институт им. академика С.П. Королева (1975), кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехника и тепловые двигатели, автор более 70 научных работ, область интересов – физика и моделирование процесса горения в камерах сгорания ГТД.

Лукачев Сергей Викторович, 1949г.р., окончил Куйбышевский авиационный институт им. академика С.П. Королева (1973), доктор технических наук, профессор, академик авиации и космонавтики, Заслуженный работник высшей школы, заведующий кафедрой теплотехника а тепловые двигатели, автор более 150 научных работ, область интересов - физика и моделирование процесса горения в камерах сгорания ГТД.

Матвеев Сергей Геннадьевич, 1959г.р., окончил Куйбышевский авиационный институт им. академика С.П. Королева (1982), кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехника а тепловые двигатели, имеет более 70 научных работ, область интересов – физика и моделирование процесса горения в камерах сгорания ГТД.